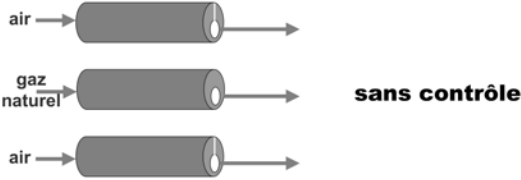
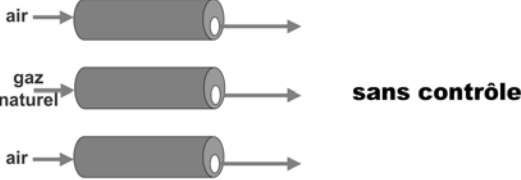
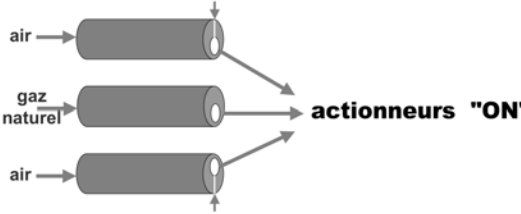
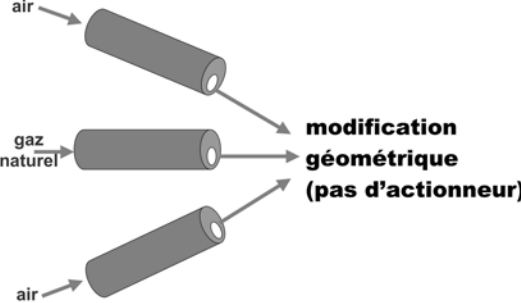


Lire la première partie de la thèse

## Chapitre 5

# Calculs LES de brûleurs à jets séparés

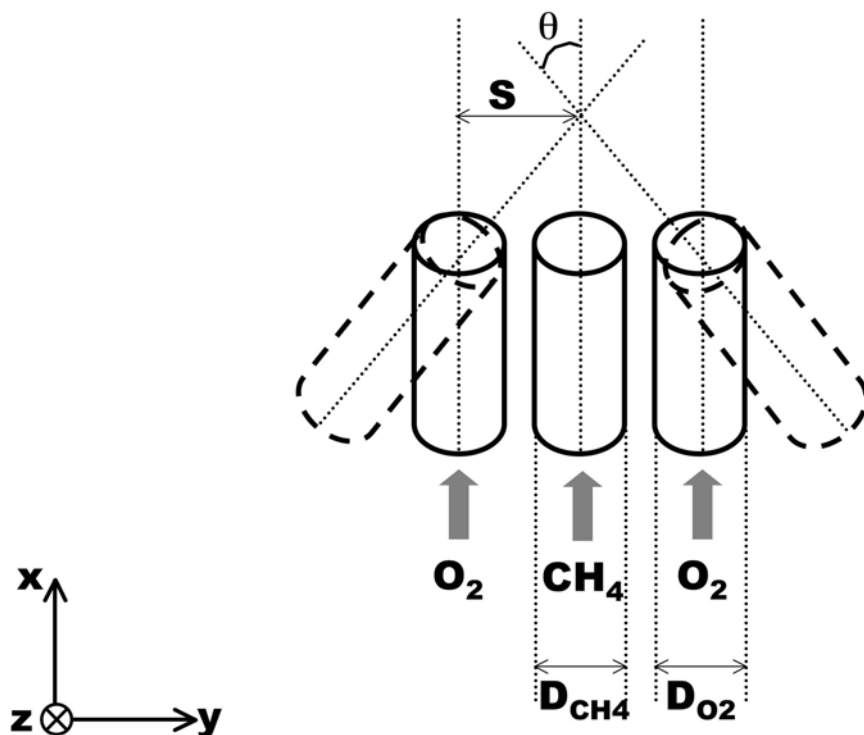
L'interaction de jets inclinés a été caractérisée expérimentalement au chapitre précédent et l'intérêt de la LES pour simuler ce type d'écoulements a été montré. Il s'agit à présent de reprendre ce problème dans un cas réel d'oxy-flamme de jets séparés et de vérifier la capacité d'un calcul LES réactif à déterminer les propriétés de la flamme. Un second objectif est d'analyser comment la déviation des jets de réactifs modifie la structure de la flamme dans des brûleurs à jets séparés. Bien qu'il existe des résultats expérimentaux sur cette question, dupliquer ces expériences avec des LES est un objectif à long terme qui doit être poursuivi. Les calculs présentés dans ce chapitre sont basés sur des résultats expérimentaux, obtenus sur un brûleur méthane-oxygène à trois jets du CORIA, par Salentey [84] en 2002 et Boushaki *et al.* [13] en 2007. Contrairement au chapitre précédent, ce sont ici les injecteurs qui sont directement inclinés, la déviation des jets n'est pas créée par des actionneurs (cf. Tab. 5.1). Cependant, ce cas mime très bien le comportement de brûleurs réels qui seraient équipés des actionneurs décrits précédemment. C'est donc le problème d'une flamme de jets séparés en interaction qui est isolé dans ce chapitre et qu'on étudie à l'aide de la LES. Avant de lancer un calcul tridimensionnel réactif, un modèle simplifié de cinétique chimique est établi : la réaction chimique d'oxycombustion est réduite à un schéma à deux étapes, adapté d'un schéma classique méthane/air. Enfin, le modèle de flamme épaissie dynamique d'AVBP est utilisé pour simuler un brûleur à jets droits et un brûleur à jets inclinés.

Configuration envisagée avec actionneurs	Configuration traitée dans ce chapitre
	
	

TAB. 5.1: Analogie entre configuration industrielle envisagée et configuration traitée dans ce chapitre

## 5.1 Configuration expérimentale et paramètres retenus

Le dispositif expérimental est un brûleur de 25kW, à trois jets séparés, installé au CORIA et qui a donné lieu à plusieurs études, aussi bien expérimentales [12, 13, 85] que numériques [47, 54]. Le brûleur se compose de trois tubes ronds, séparés et alignés ; il est représenté sur la figure 5.1. Le système d'axes est le même que dans le chapitre précédent : les injecteurs sont alignés dans la direction transverse  $y$ , la coordonnée axiale est  $x$  et  $z$  sera appelée direction latérale dans tout le chapitre. Les deux tubes extérieurs injectent de l'oxygène pur et le jet central est composé de gaz naturel. Les réactifs sont injectés en proportions stœchiométriques. Le gaz naturel sera assimilé ici, et plus loin dans les calculs, à du méthane dont il est constitué à environ 90%. L'écartement  $S$  entre les axes des jets ainsi que les diamètres  $D_{O_2}$  et  $D_{CH_4}$  sont réglables. Les deux jets d'oxygène sont inclinables jusqu'à  $\theta = 30^\circ$  vers le jet central. Ce brûleur est installé dans un four de grande taille (60cm \* 60cm de section et 1m de long), muni d'accès optiques pour les visualisations de flamme, instrumenté avec des thermocouples et terminé par un convergent qui limite les entrées d'air par la sortie. Les injecteurs débouchent au ras de la paroi du four, ce qui évite tout entraînement de gaz ambiants par l'amont. Ce banc d'essai est donc très modulable et de nombreuses configurations ont été testées et documentées. Nous en avons retenu deux pour nos



**FIG. 5.1:** Schéma et système d'axes du brûleur à jets séparés expérimental du CORIA

simulations, une avec les jets d'oxygène droits (configuration 60608 de Salentey [84]), qui servira de référence, et une autre où les jets d'oxygène sont inclinés à  $30^\circ$  et impactent le jet central de carburant [13]. Les caractéristiques de ces deux configurations sont réunies dans le tableau 5.2.

	Configuration JETS DROITS	Configuration JETS INCLINÉS
$S$	8 mm	12 mm
$D_{CH_4} = D_{O_2}$	6 mm	6 mm
$\theta$	$0^\circ$	$30^\circ$
$\dot{m}_{CH_4}$	0.556 g/s	0.556 g/s
$V_{CH_4}$	23.6 m/s	23.6 m/s
$Re_{CH_4}$	10727	10727
$\dot{m}_{O_2}$ (1jet)	0.982 g/s	0.982 g/s
$V_{O_2}$ (1jet)	25.4 m/s	25.4 m/s
$Re_{O_2}$ (1jet)	10792	10792

TAB. 5.2: Paramètres de fonctionnement du brûleur dans les deux configurations retenues

Les diamètres des injecteurs d'oxygène et de méthane sont les mêmes et seront donc notés indistinctement  $D$  dans la suite de ce chapitre. Hormis l'angle d'inclinaison des jets d'oxygène, la seule différence entre les deux configurations est l'écartement entre les jets. Malgré cette différence, il sera vu plus loin que les comparaisons entre les deux configurations permettent d'analyser les effets de la mise en impact des jets d'oxygène.

## 5.2 Calculs à froid

### 5.2.1 Paramètres du calcul

Le calcul de l'écoulement non-réactif a pour but de retrouver le champ de vitesse expérimental qui doit servir de solution initiale aux calculs de flamme. Il est réalisé sur la configuration à jets droits et permet d'évaluer la capacité de la LES à prédire la dynamique de cet écoulement. Le domaine de calcul correspond exactement à la géométrie de l'ensemble brûleur + four. Il est représenté sur la figure 5.2. Le maillage, réalisé en 2005 au CERFACS par Jouhaud [42], est non-structuré et comprend 1071525 cellules tétraédriques, raffinées dans la zone de développement des jets. Les conditions aux limites sont du même type que celles utilisées dans les calculs du chapitre 4 : un profil turbulent moyen de vitesse (semi-empirique) est injecté dans les trois tubes avec une condition caractéristique ; la sortie est une condition de pression semi-refléchissante et les parois sont adiabatiques et non-glissantes.

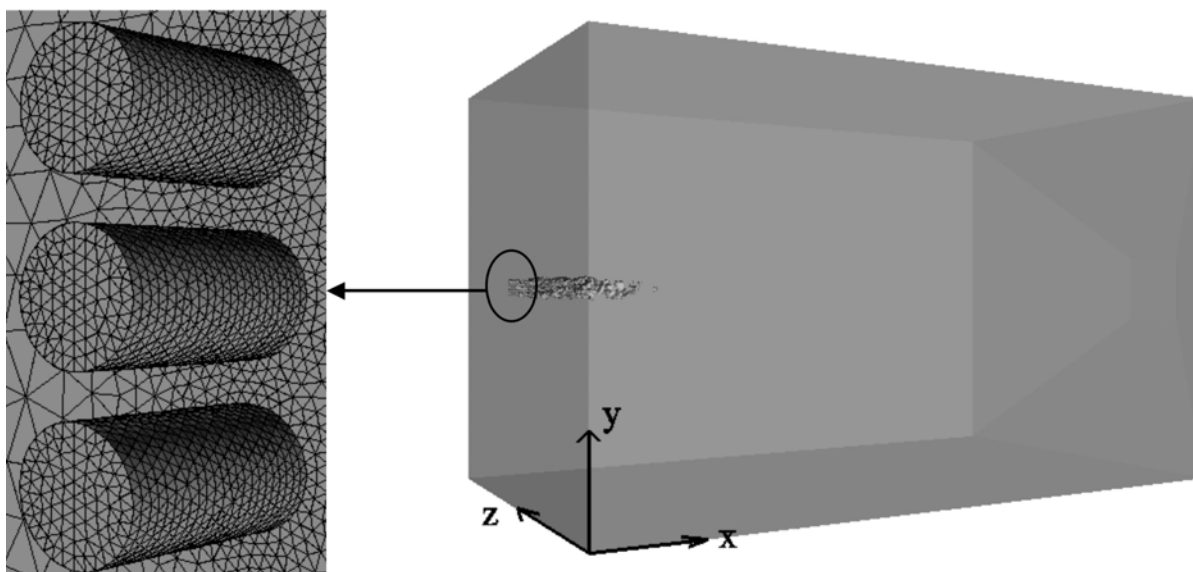


FIG. 5.2: Domaine de calcul et détail du maillage du brûleur à trois jets

Le calcul est réalisé avec le schéma numérique TTGC, le modèle de sous-maille de Smagorinsky, et les résultats sont moyennés sur 40 ms de temps physique. Cette durée correspond seulement à un temps de transit entre l'injection et la sortie de la boîte mais les tests montrent que les résultats en champ proche sont convergés sans difficulté quand le calcul est moyenné sur 40 ms ; en effet, en zone proche du jet, l'écoulement s'établit très vite.

### 5.2.2 Dynamique et mélange de l'écoulement non-réactif

Une coupe  $x * y$  du champ instantané de vitesse axiale est présentée sur la figure 5.3. L'agitation turbulente est visible sur les couches de mélange des trois jets qui gardent leur direction initiale et commencent à interagir à une distance axiale de 1 diamètre. Le jet central de méthane semble légèrement moins agité, peut-être par un effet de confinement par les jets d'oxygène. Ceci se traduit sur la coupe du champ moyen de vitesse (cf. Fig. 5.4) par un cône potentiel du jet de méthane légèrement plus long que celui des jets d'oxygène. En aval de la fin de ce cône potentiel, l'écoulement forme un jet unique. Aux sept stations axiales représentées, des profils de vitesse sont extraits et comparés aux mesures par Vélocimétrie Laser Doppler de Salentey [84].

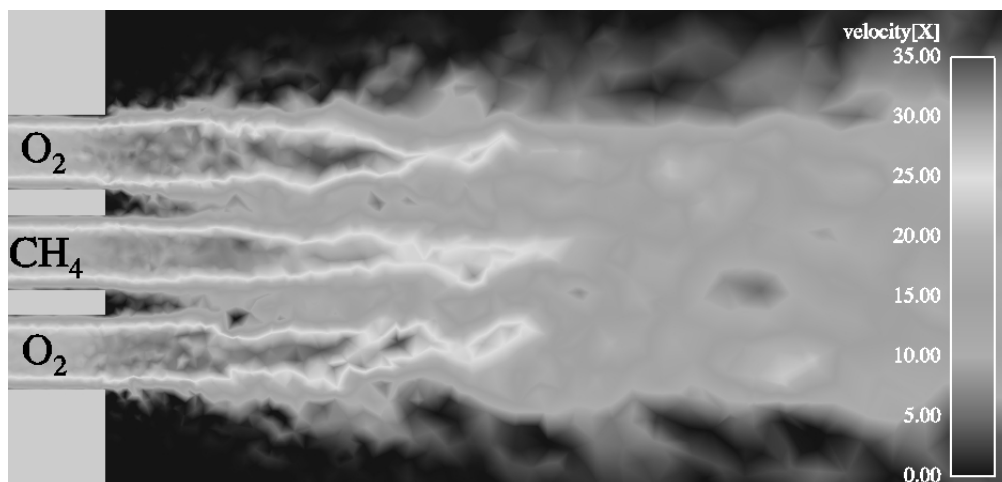


FIG. 5.3: Champ LES instantané de vitesse axiale de l'écoulement à trois jets non-réactif

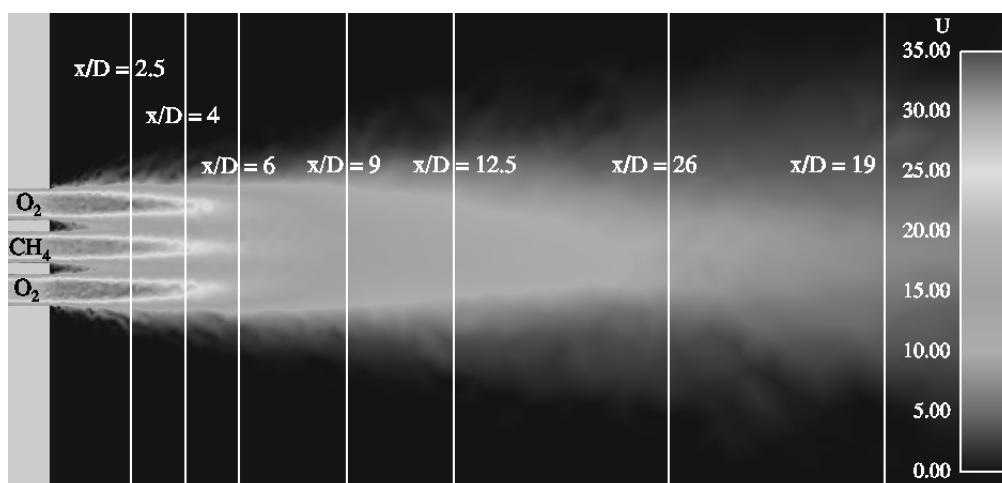
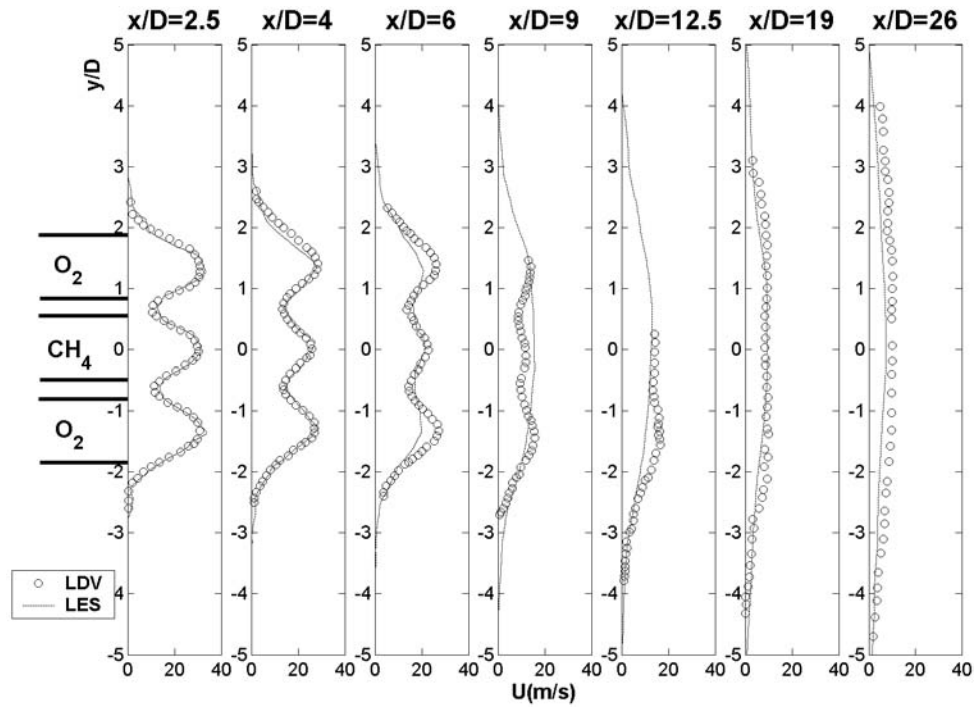


FIG. 5.4: Champ LES moyen de vitesse axiale de l'écoulement à trois jets non-réactif

La vitesse axiale, présentée sur la figure 5.5, est correctement retrouvée par le calcul. On note que la décroissance de vitesse des jets d'oxygène et la formation d'un profil global homogène, de type "jet unique", apparaissent légèrement trop tôt (entre  $x/D = 6$  et  $x/D = 9$ ) dans le calcul, en comparaison avec l'expérience.



**FIG. 5.5:** Comparaison LES/LDV [84] des profils transverses de vitesse axiale de l'écoulement non-réactif

Les figures 5.6 et 5.7 montrent des profils de vitesse axiale, cette fois selon la direction latérale  $z$ , aux cinq premières stations axiales. Ceci permet d'isoler le comportement du jet de méthane et d'un jet d'oxygène et confirme que la LES prédit précisément le comportement du jet de méthane en même temps qu'une décroissance de vitesse trop forte dans les jets d'oxygène.



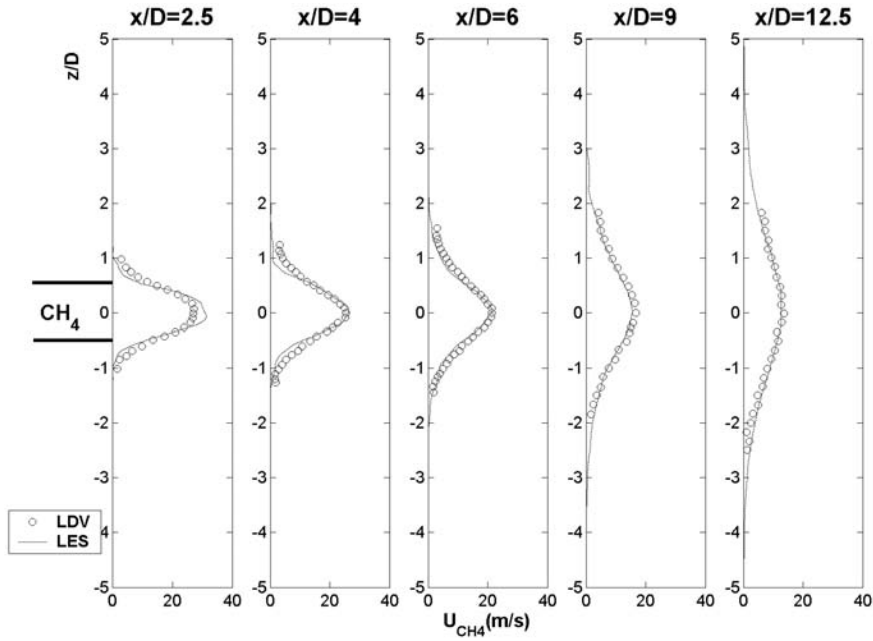


FIG. 5.6: Comparaison LES/LDV [84] des profils latéraux ( $z$ ) de vitesse axiale du jet de méthane

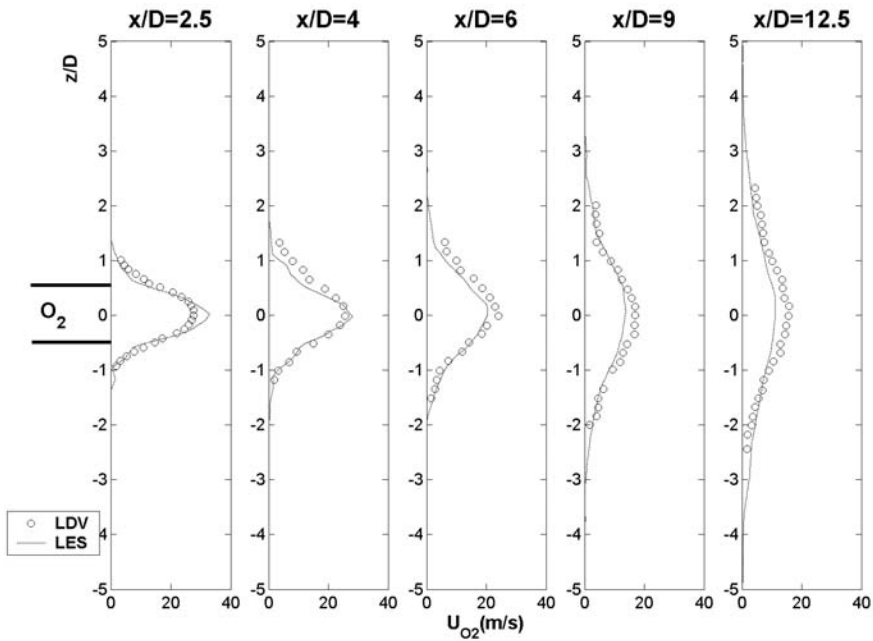
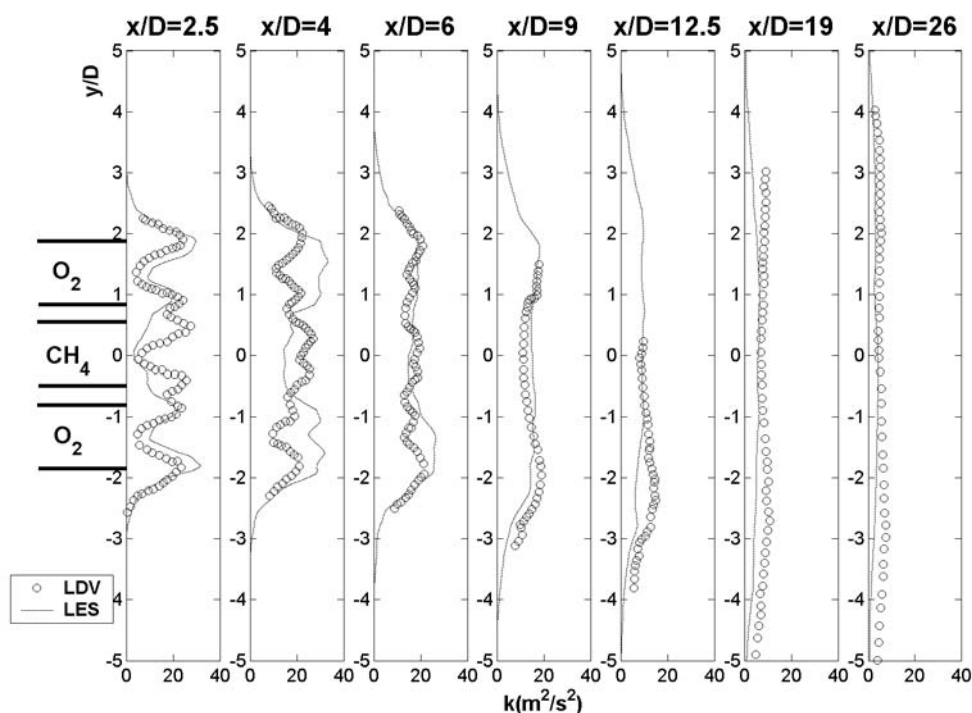


FIG. 5.7: Comparaison LES/LDV [84] des profils latéraux ( $z$ ) de vitesse axiale d'un jet d'oxygène

Pour terminer la caractérisation de la dynamique de cet écoulement non-réactif, on s'intéresse à l'énergie cinétique turbulente, dont les profils transverses sont représentés sur la figure 5.8



**FIG. 5.8:** Comparaison LES/LDV [84] des profils transverses d'énergie cinétique turbulente de l'écoulement non-réactif

La comparaison avec les valeurs expérimentales montre que la répartition exacte de la turbulence en champ proche ne se retrouve pas parfaitement dans notre calcul, même si les niveaux sont globalement bons ; en particulier les pics d'énergie correspondant aux couches de mélange du jet de méthane n'apparaissent pas, alors que les pics d'énergie liés aux jets d'oxygène sont bien reproduits. Ceci serait sans doute amélioré par une condition limite en entrée avec injection de fluctuations turbulentes, ce qui n'a pas été tenté ici. Néanmoins, l'énergie cinétique turbulente est bien retrouvée en champ plus lointain (à partir de  $x/D = 6$ ), après que la turbulence a diffusé dans tout l'écoulement.

Avant de passer à un calcul en combustion, on vérifie les valeurs de mélange obtenues par la LES en les comparant aux mesures de Salentey [84]. Pour des réactifs non-prémélangés, la ligne stœchiométrique correspond à la position la plus favorable pour la stabilisation d'une flamme de diffusion ; elle est définie comme l'ensemble des points où la fraction de mélange  $Z$  est à la valeur stœchiométrique. La réaction

globale de l'oxy-combustion du méthane s'écrit :



$Z$  peut s'exprimer, à partir des fractions massiques de méthane et d'oxygène, par :

$$Z = \frac{sY_{\text{CH}_4} - Y_{\text{O}_2} + Y_{\text{O}_2}^0}{sY_{\text{CH}_4}^0 + Y_{\text{O}_2}^0} \quad (5.2)$$

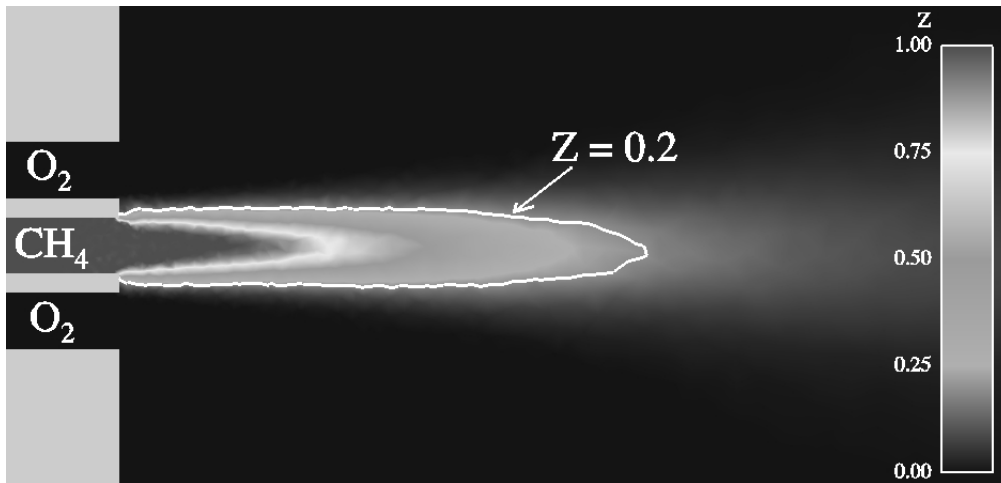
où  $s$  est le rapport stœchiométrique :

$$s = \frac{v'_{\text{O}_2} W_{\text{O}_2}}{v'_{\text{CH}_4} W_{\text{CH}_4}} = \frac{2 * 32}{1 * 16} = 4 \quad (5.3)$$

La valeur stœchiométrique  $Z_{st}$  de la fraction de mélange est obtenue sur le front de flamme, où  $Y_{\text{CH}_4} = Y_{\text{O}_2} = 0$ , d'où :

$$Z_{st} = \frac{Y_{\text{O}_2}^0}{4Y_{\text{CH}_4}^0 + Y_{\text{O}_2}^0} = \frac{1}{4 + 1} = 0.2 \quad (5.4)$$

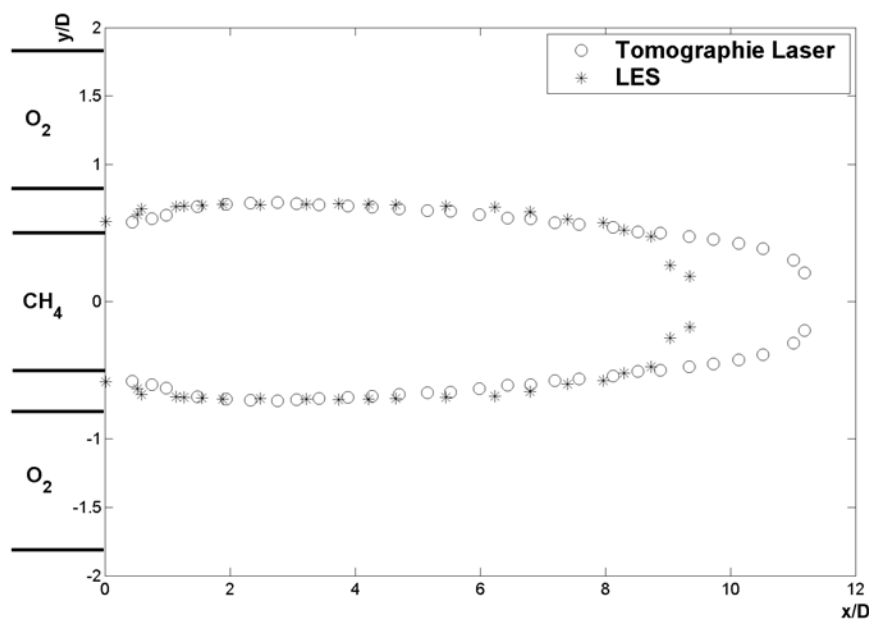
La figure 5.9 montre une coupe  $x * y$  du champ de  $Z$  issu du calcul. On vérifie bien que  $Z$  prend des



**FIG. 5.9:** Champ LES moyen de  $Z$  et ligne stœchiométrique dans l'écoulement à trois jets non-réactif

valeurs comprises entre 0 au niveau de l'injection de méthane et 1 au niveau de l'oxygène pur. La ligne stœchiométrique se développe autour du jet de méthane. La position calculée de cette ligne est affichée sur la figure 5.10, avec la position de la ligne stœchiométrique trouvée expérimentalement par Salentey [84] en utilisant une technique de tomographie laser (pour une visualisation plus aisée, les données expérimentales qui ne décrivent qu'une branche de la ligne stœchiométrique ont été symétrisées par rapport

à l'axe du jet de méthane ; il a été fait de même avec les valeurs de la LES, d'où l'aspect symétrique de la ligne stœchiométrique). Les lignes stœchiométriques expérimentales et numériques se superposent parfaitement en champ proche. Leur développement axial est comparable mais sous-estimé par la LES, certainement à cause de la vitesse axiale des jets d'oxygène, dont on a vu sur la figure 5.7 qu'elle était aussi sous-estimée, pour des distances axiales comprises entre 9 et 12 diamètres.



**FIG. 5.10:** Comparaison LES/tomographie laser [84] de la position de la ligne stœchiométrique sur une coupe  $x*y$  de l'écoulement à trois jets

Pour résumer cette partie, le calcul de l'écoulement à froid donne globalement des résultats satisfaisants en terme de dynamique et mélange des trois jets. Il pourrait être amélioré par un traitement plus précis des conditions d'injection des réactifs (en particulier, injection de turbulence) mais constitue une base suffisamment précise pour étudier l'effet de l'impact entre les jets, dans une configuration réactive.

## 5.3 Réduction de la cinétique chimique : modèle oxy-CM2

### 5.3.1 Principe

Dans un calcul de flamme, la résolution de la chimie de la combustion consiste à résoudre une équation de transport pour chaque espèce présente et à prendre en compte chaque réaction élémentaire dans le calcul du taux de réaction de cette espèce (cf. Eq. 3.15). Les espèces mises en jeu et leurs réactions

élémentaires, décrivant les processus d’amorçage, propagation et terminaison de la réaction globale, constituent le schéma cinétique de la réaction. Ce schéma cinétique fait généralement intervenir plusieurs centaines d’espèces et de réactions élémentaires (53 espèces et 325 réactions dans le cas particulier de la combustion du méthane dans l’air) et ne peut donc pas être intégré dans un calcul LES réaliste, tri-dimensionnel, pour des raisons évidentes de temps de calcul. Plusieurs méthodes sont possibles pour contourner cette difficulté :

- utiliser des schémas cinétiques réduits [59, 87],
- tabuler la cinétique chimique comme dans les méthodes ILDM [57, 56], FPI-PCM [29], ISAT [90] ou FGM [100].

Dans cette thèse, on utilise un schéma réduit à deux étapes, adapté à la combustion  $CH_4/O_2$  et appelé Oxy-CM2. Ce schéma a été développé spécifiquement pour ce travail et sa construction est décrite ci-dessous. Il offre un compromis entre efficacité numérique et précision de la représentation physique. Le nombre d’espèces prises en compte par le modèle conditionne naturellement les prédictions du code en terme d’émissions, mais aussi en ce qui concerne les phénomènes instationnaires tels que l’allumage et l’extinction [15]. Dans notre étude, la flamme est considérée allumée et on ne s’intéresse pas à ses émissions, on peut donc choisir un schéma très réduit et les critères retenus pour affiner notre modèle portent sur la température de fin de combustion et la vitesse de flamme laminaire, grandeurs primordiales dans le modèle de combustion d’AVBP, et qui résultent directement de la cinétique chimique. Notre schéma comporte deux étapes et fait intervenir sept espèces, il reprend les réactions élémentaires du schéma CM2 ([http://www.cerfacs.fr/~avbp/AVBP\\_V5.X/AVBPHELP/PARAM/chemistry/ch4/2s/cm2/index.html](http://www.cerfacs.fr/~avbp/AVBP_V5.X/AVBPHELP/PARAM/chemistry/ch4/2s/cm2/index.html)), classiquement utilisé pour les flammes méthane/air, qui s’écrit :

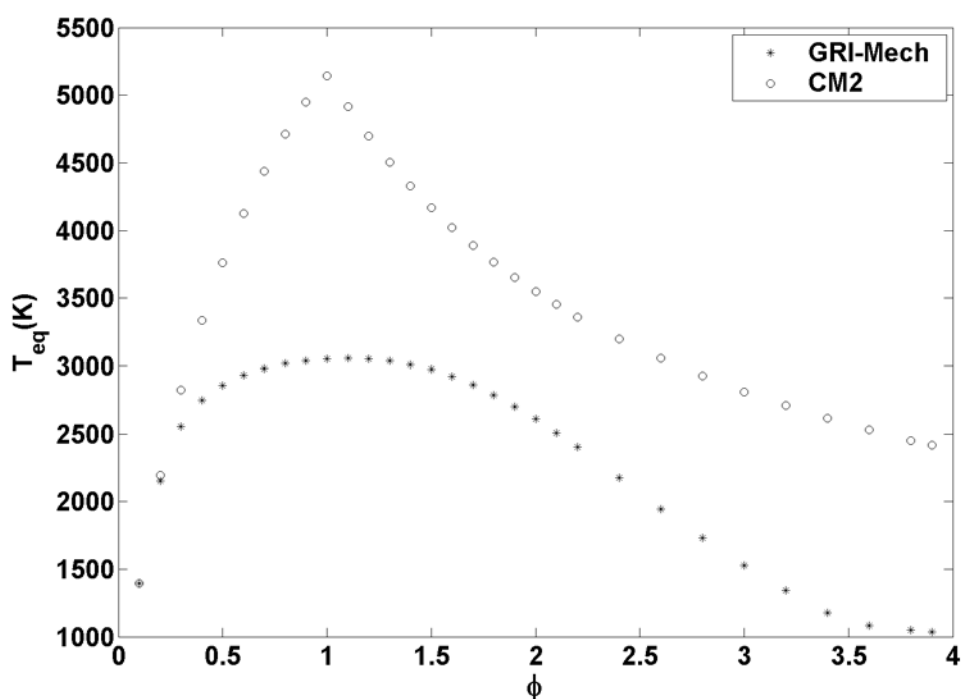


Ce schéma, valide pour des flammes méthane/air ne peut être utilisé directement pour des flammes méthane/oxygène. Il a donc été adapté comme décrit ci-dessous, en ajustant les vitesses de flamme laminaire prémélangée et les températures de fin de combustion, pour des richesses allant de 0 à 2. Les tests de ce modèle ont été réalisés avec le code de calcul de flamme monodimensionnelle COSI-LAB. Ce code résout les équations de conservation des espèces et de l’énergie en une dimension et en régime laminaire prémélangé, à partir d’un schéma cinétique donné et d’un calcul complet des coefficients de transport. Les températures de fin de combustion sont obtenues par un calcul d’équilibre thermochimique. On utilise comme référence le schéma complet du Gas Research Institute (GRI-Mech :

<http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/>). Les résultats de COSILAB avec Oxy-CM2 et avec le schéma complet permettent, par comparaison, d'ajuster les constantes d'Oxy-CM2 pour reproduire au mieux les résultats du schéma complet.

### 5.3.2 Température de flamme

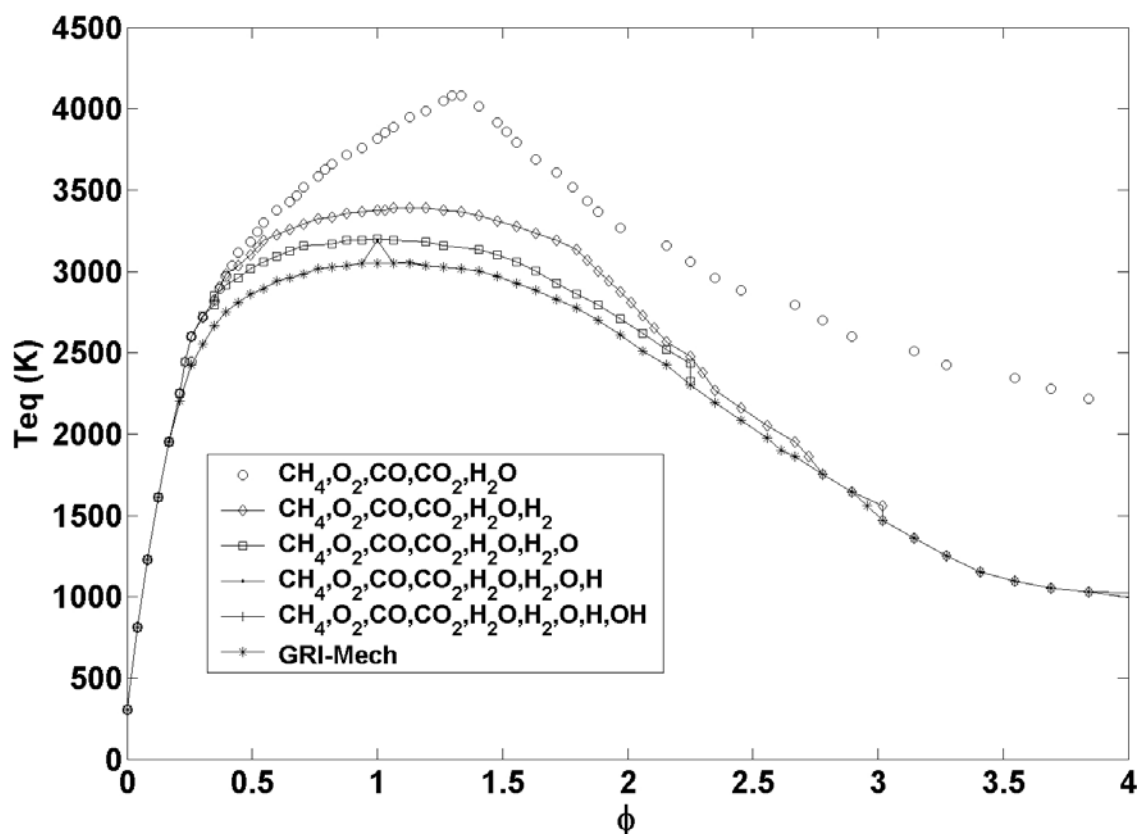
En ne prenant en compte que sept espèces, le schéma réduit CM2, conçu à l'origine pour les flammes méthane/air, néglige des réactions de dissociation endothermiques : la température de fin de combustion obtenue est donc supérieure à la température réelle de l'oxy-flamme, qu'on retrouve avec le schéma complet. On peut le voir sur le graphe de la figure 5.11, qui montre les résultats d'un calcul d'équilibre à différentes richesses, pour les deux schémas : le schéma CM2 surestime grandement les températures de fin de combustion sur toute la gamme de richesse. Pour retrouver précisément la température



**FIG. 5.11:** Température d'équilibre d'une flamme méthane-oxygène calculée avec le schéma complet (GRI-Mech) et le schéma CM2 prévu pour la combustion méthane/air

de la flamme méthane-oxygène, Vervisch [102] a montré que la prise en compte d'au moins neuf espèces ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{OH}$ ) était nécessaire (cf. Fig. 5.12). Se contenter d'ajouter l'équilibre  $\text{CO}/\text{CO}_2$  (comme fait pour les flammes méthane/air) n'est pas suffisant dans une flamme mé-

thane/oxygène. Pour être rigoureux, il faudrait utiliser neuf espèces, ce qui rendrait la LES très difficile. Pour s'affranchir de cette procédure lourde, la technique de modélisation choisie dans Oxy-CM2 consiste

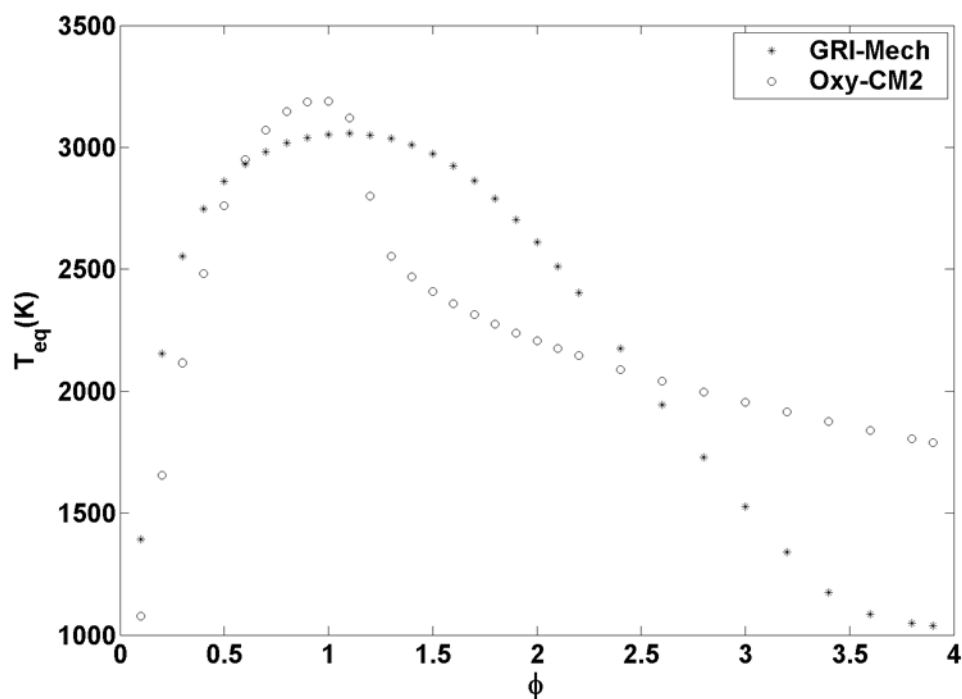


**FIG. 5.12:** Variation de la température d'équilibre d'une flamme méthane-oxygène avec le nombre d'espèces prises en compte (d'après [102]) : seule la prise en compte de neuf espèces ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{OH}$ ) permet de retrouver la solution exacte GRI-Mech.

à modifier l'enthalpie de formation de certaines espèces, grandeur qui intervient directement dans le calcul de la température de fin de combustion (cf. Eq. 3.10). En ajustant l'enthalpie de  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}$  (valeurs présentées dans le tableau 5.3), on obtient pour la température de fin de combustion de notre oxy-flamme, la courbe représentée sur la figure 5.13. Il faut noter que cette procédure ne modifie pas d'autres propriétés des espèces en question puisque, comme il été vu au chapitre 3, l'enthalpie de formation n'apparaît que dans le calcul du taux de dégagement de chaleur (eq. 3.10) et de la constante d'équilibre chimique. La température de flamme obtenue avec le modèle Oxy-CM2 est conforme à celle du schéma complet en régime pauvre et satisfaisante à la stœchiométrie. Pour notre régime non-prémélangé, on peut imaginer que la réaction a lieu autour de la stœchiométrie, aussi l'erreur de notre modèle sur la température en

Enthalpie de formation (kJ/mol)	H <sub>2</sub> O	CO
Valeur réelle	-239	-114
Valeur ajustée	-117	-69

**TAB. 5.3:** Enthalpie de formation réelle et ajustée pour le schéma Oxy-CM2 de H<sub>2</sub>O et CO



**FIG. 5.13:** Température d'équilibre d'une flamme méthane-oxygène calculée avec le schéma complet (GRI-Mech) et le schéma Oxy-CM2 adapté à la combustion oxygène/méthane

régime riche reste acceptable et la complexité du schéma reste réduite au maximum.



### 5.3.3 Vitesse de flamme laminaire

L'autre propriété fondamentale que doit retrouver le modèle cinétique utilisé est la vitesse de flamme laminaire. Comme le montrent Poinot et Veynante [76], c'est un résultat quasiment décorrélié de la température de fin de combustion et qui dépend des paramètres chimiques (constante pré-exponentielle, énergie d'activation) de la loi d'Arrhénius décrivant chaque réaction élémentaire. Le schéma original CM2 appliqué à l'oxy-combustion du méthane ne retrouve pas la vitesse de flamme  $s_L$ , comme le montre la figure 5.14, où est tracée  $s_L$  en fonction de la richesse, pour les schémas CM2 et GRI-Mech.

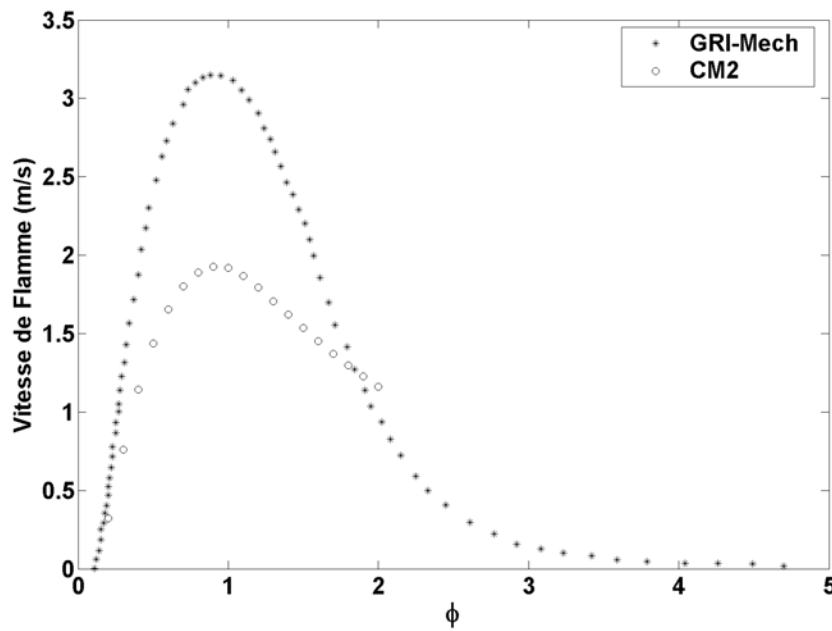


FIG. 5.14: Vitesse de flamme laminaire calculée avec le schéma complet (GRI-Mech) et le schéma CM2

Pour obtenir la bonne vitesse de flamme, principalement en régime stoechiométrique, la constante pré-exponentielle des réactions 5.5 et 5.6 doit être ajustée. En multipliant ces deux constantes par 2.65, on trouve la vitesse de flamme présentée sur la figure 5.15. On constate que jusqu'à des richesses d'environ 1.5, le modèle retrouve très précisément la vitesse de flamme du schéma complet. On note d'ailleurs que l'accord entre Oxy-CM2 et GRI-Mech est bien meilleur que ce qui est classiquement obtenu pour des flammes méthane/air, où CM2 surestime très largement la vitesse de flamme du côté riche. Ceci est dû à l'absence de  $N_2$ . Les résultats présentés sur les figures 5.13 (températures adiabatiques) et 5.15 (vitesses de flamme) constituent donc une validation de notre modèle de cinétique chimique.

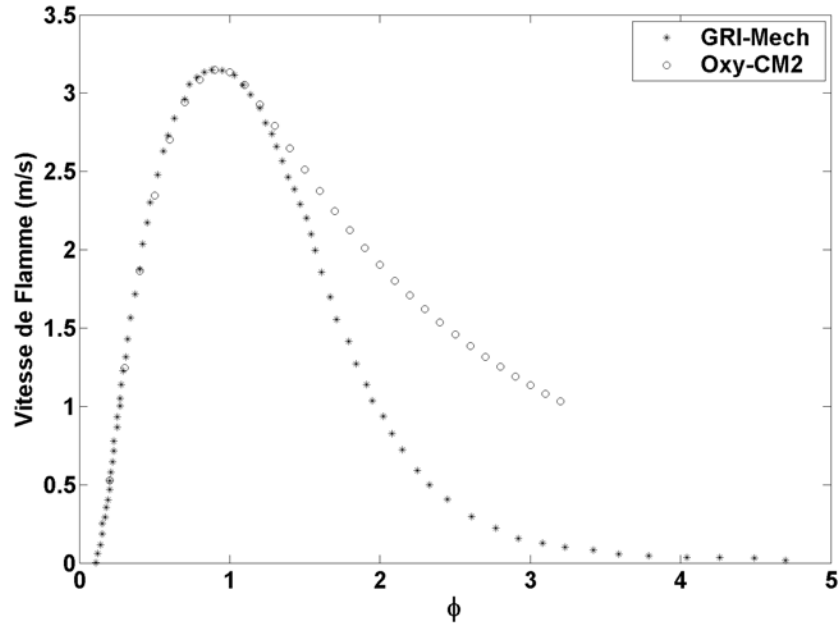


FIG. 5.15: Vitesse de flamme laminaire calculée avec le schéma complet (GRI-Mech) et le schéma Oxy-CM2

### 5.3.4 Paramètres finaux du schéma Oxy-CM2

En résumé, les taux d'avancement des réactions 5.5 et 5.6 s'écrivent :

$$Q_1 = A_1 \left( \frac{\rho Y_{CH_4}}{W_{CH_4}} \right)^{v'_{1,CH_4}} \left( \frac{\rho Y_{O_2}}{W_{O_2}} \right)^{v'_{1,O_2}} \exp \left( -\frac{E_{a1}}{RT} \right) \quad (5.7)$$

$$Q_2 = A_2 \left[ \left( \frac{\rho Y_{CO}}{W_{CO}} \right)^{v'_{2,CO}} \left( \frac{\rho Y_{O_2}}{W_{O_2}} \right)^{v'_{2,O_2}} - \frac{1}{K_e} \left( \frac{\rho Y_{CO_2}}{W_{CO_2}} \right)^{v''_{1,CO_2}} \right] \exp \left( -\frac{E_{a2}}{RT} \right) \quad (5.8)$$

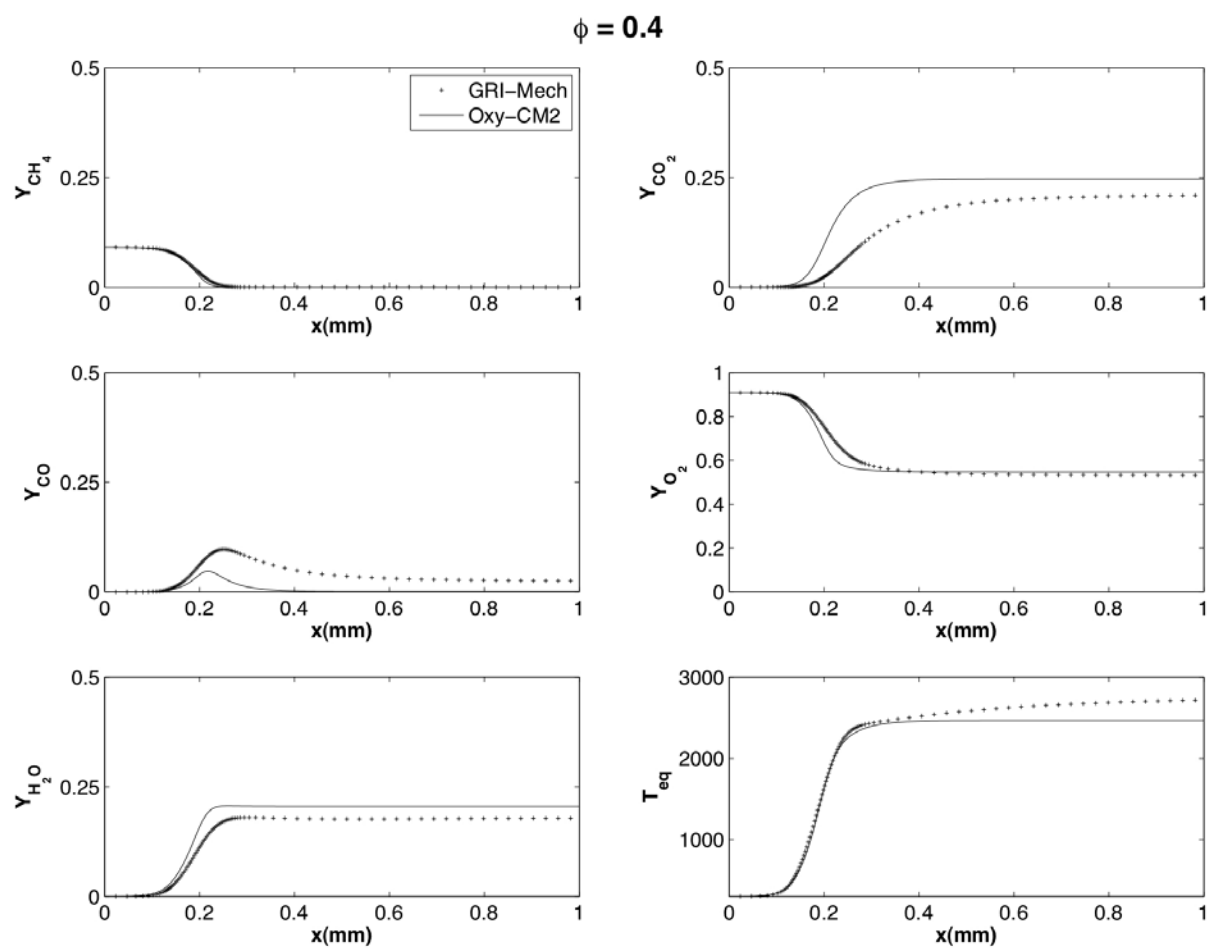
Les valeurs des constantes préexponentielles et des énergies d'activation sont notées dans la table 5.4, qui résume les paramètres du schéma Oxy-CM2 et les compare au schéma CM2, employé pour les flammes méthane/air. Les exposants  $v'_{1,CH_4}$ ,  $v'_{1,O_2}$ ,  $v'_{2,CO}$ ,  $v'_{2,O_2}$ ,  $v''_{1,CO_2}$  et les énergies d'activation sont inchangés. Les nombres de Schmidt et Prandtl de toutes les espèces sont égaux et constants :  $Sc = 1$  et  $Pr = 0.68$ .

	CM2 : Méthane/Air	Oxy-CM2 : Méthane/Oxygène
$A_1$ (cgs)	$2.10^{15}$	$5,3.10^{15}$
$A_2$ (cgs)	$2.10^9$	$5,3.10^9$
$E_{a1}$ (cal/mol)	35000	35000
$E_{a2}$ (cal/mol)	12000	12000
$v'_{1,CH_4}$	0.9	0.9
$v'_{1,O_2}$	1.1	1.1
$v'_{2,CO}$	1	1
$v'_{2,O_2}$	0.5	0.5
$v''_{1,CO_2}$	1	1

TAB. 5.4: Comparaison des paramètres numériques des schémas CM2 et Oxy-CM2

### 5.3.5 Comparaison des structures de flamme Oxy-CM2 et GRI-Mech

Les figures 5.13 et 5.15 montrent que le schéma Oxy-CM2 reproduit la température de fin de combustion et la vitesse de flamme sur une large gamme de richesse. Il est intéressant de comparer aussi les structures de flamme détaillées obtenues avec les deux schémas. Ceci est fait pour une flamme laminaire prémélangée pauvre ( $\phi = 0.4$ ), à 1 Bar et 300 K et pour une flamme stœchiométrique, dans les mêmes conditions, et représenté sur les figures 5.16 et 5.17 (calculs faits avec COSILAB). Les profils de température d'Oxy-CM2 correspondent bien à ceux de GRI-Mech, en particulier à la stœchiométrie où, comme on a pu le voir déjà sur la figure 5.13, la température de fin de combustion est correctement retrouvée. Les profils d'espèces présentent des différences avec ceux du schéma complet : on note des écarts significatifs sur les valeurs de  $CO_2$  et  $CO$  par exemple. Cette observation rejoint le résultat de la figure 5.12 : pour une flamme méthane/oxygène, il faut 9 espèces au moins afin de capter correctement l'équilibre. Ajuster les enthalpies de formation de  $H_2O$  et  $CO$  permet de caler les températures de fin de combustion mais pas les niveaux précis de concentration. Malgré ces différences, le schéma Oxy-CM2 reproduit de façon assez satisfaisante la structure détaillée de la flamme.



**FIG. 5.16:** Profils GRI-Mech et Oxy-CM2 d'espèces et de température dans une flamme 1D à  $\phi = 0.4$

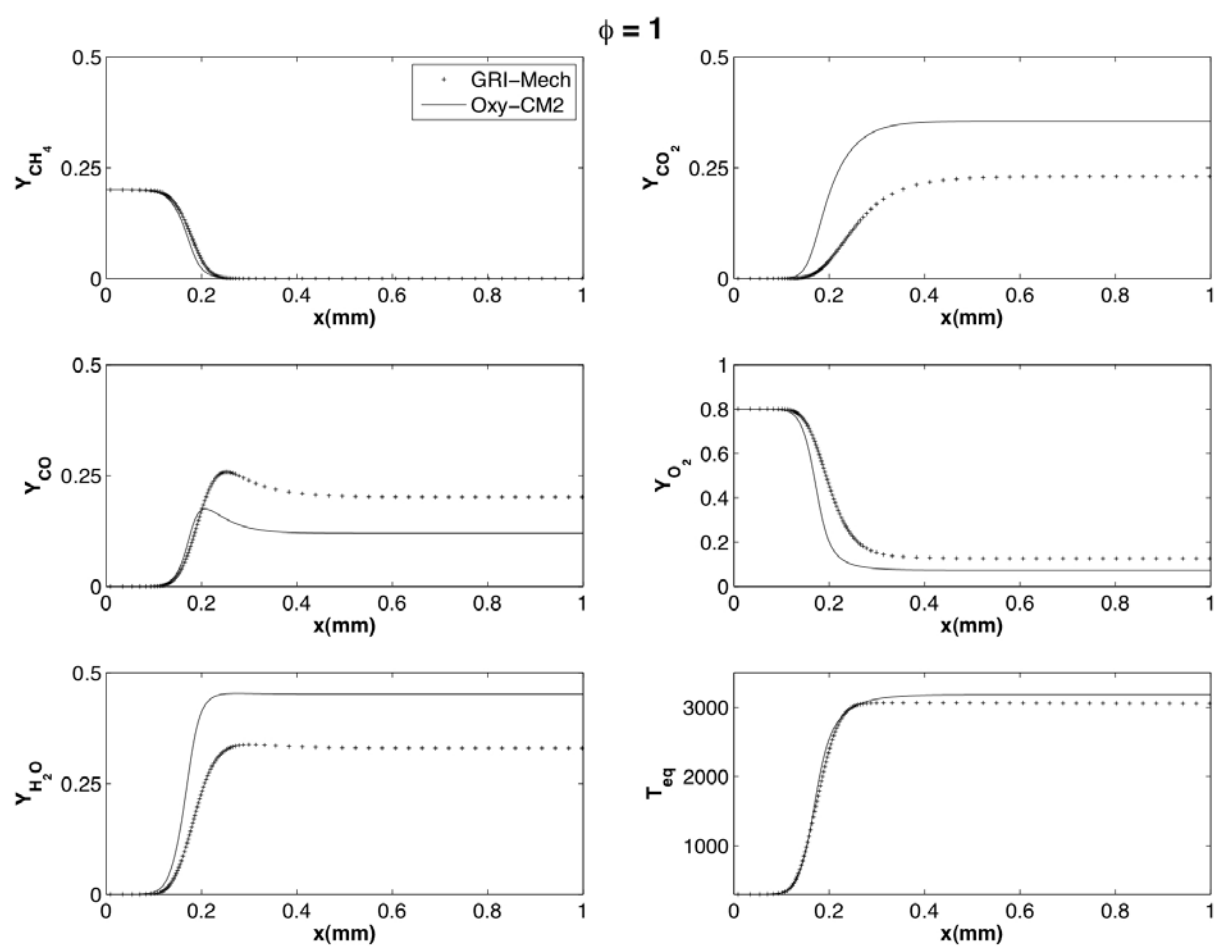
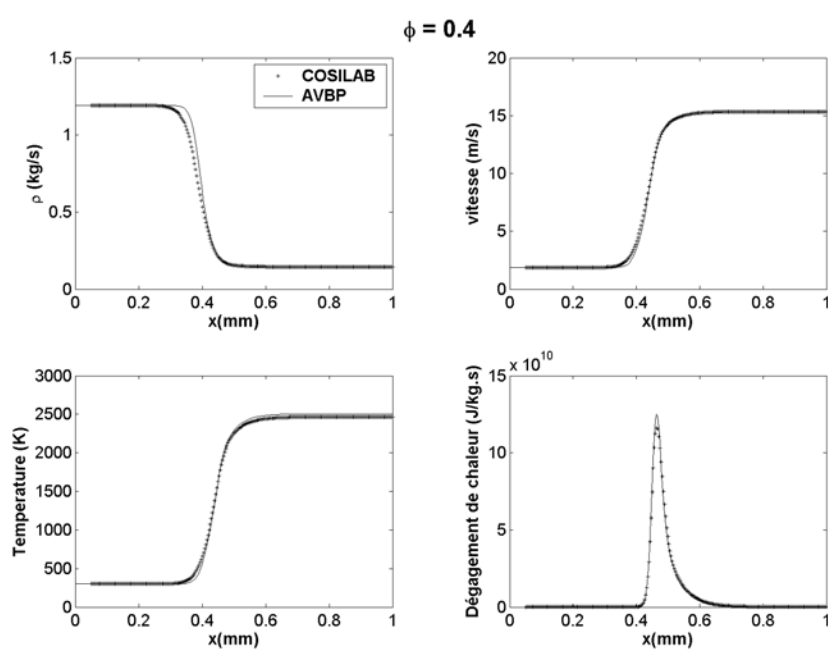


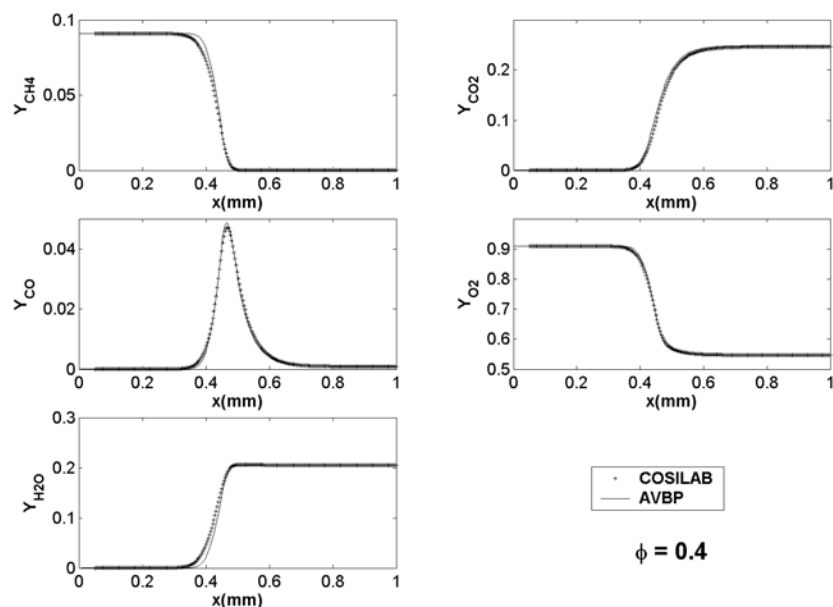
FIG. 5.17: Profils GRI-Mech et Oxy-CM2 d'espèces et de température dans une flamme 1D à  $\phi = 1$

### 5.3.6 Implantation dans AVBP

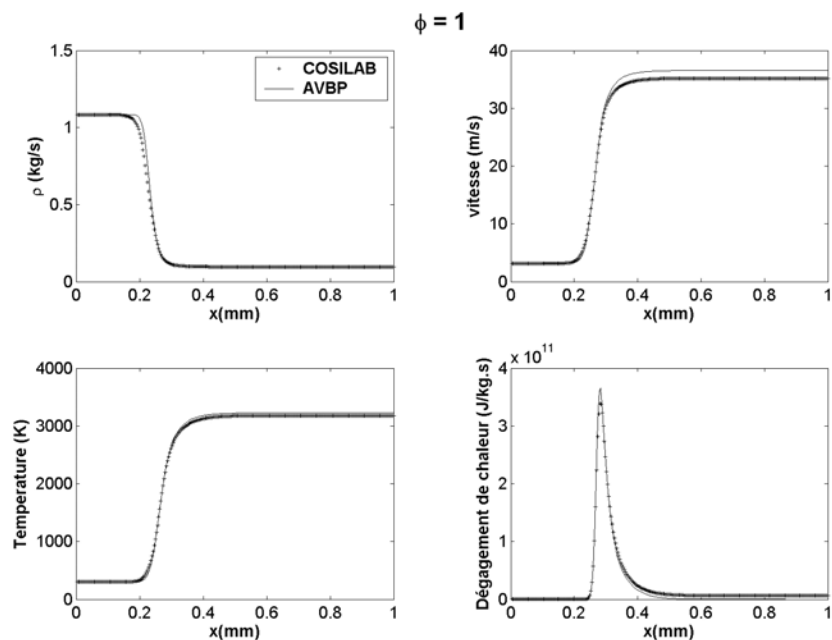
Tous les tests précédents ont été effectués dans COSILAB. L'objectif de cette partie est de vérifier sur le cas simple d'une flamme laminaire, monodimensionnelle, prémélangée, qu'AVBP, avec ses propres termes de transport et le modèle cinétique Oxy-CM2, retrouve les résultats obtenus avec COSILAB. Cette étape de validation est indispensable avant de lancer un calcul turbulent tridimensionnel. La flamme est calculée à deux richesses différentes :  $\phi = 0.4$  et  $\phi = 1$  (flamme stœchiométrique). Les résultats sont présentés sur les figures 5.18 à 5.21.



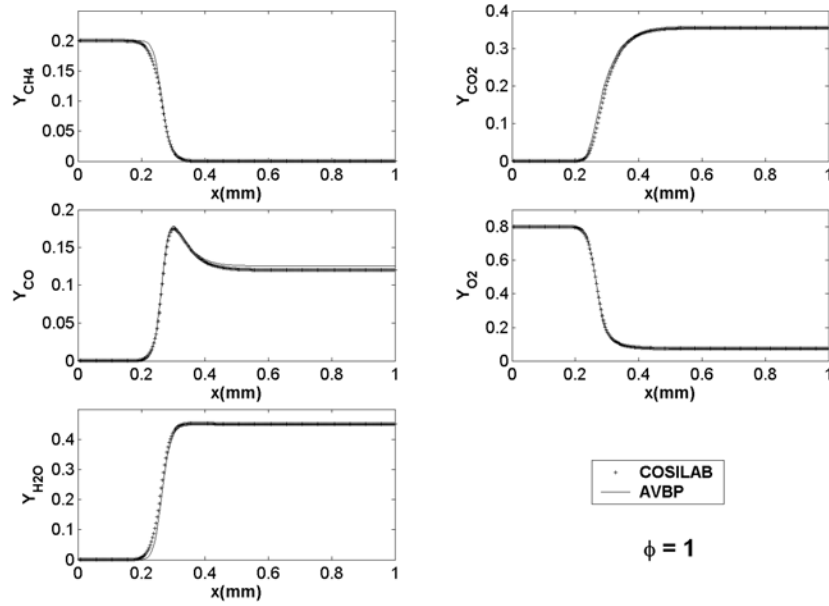
**FIG. 5.18:** Comparaison des profils de densité, température, vitesse et taux de dégagement de chaleur dans une flamme 1D à richesse 0.4 calculée avec COSILAB et AVBP



**FIG. 5.19:** Comparaison des profils d'espèces dans une flamme 1D à richesse 0.4 calculée avec COSILAB et AVBP



**FIG. 5.20:** Comparaison des profils de densité, température, vitesse et taux de dégagement de chaleur dans une flamme 1D à richesse 1 calculée avec COSILAB et AVBP



**FIG. 5.21:** Comparaison des profils d'espèces dans une flamme 1D à richesse 1 calculée avec COSILAB et AVBP

Dans les deux cas, l'accord est parfait, l'épaisseur de flamme, le taux de dégagement de chaleur et tous les profils d'espèces sont calculés de façon identique par COSILAB et AVBP et ceci démontre que le modèle Oxy-CM2 est correctement implémenté dans AVBP. A partir de la courbe de température à  $\phi = 1$  (cf. Fig. 5.20, on déduit l'épaisseur de la flamme laminaire  $\delta_L^0$  par la formule suivante [76] :

$$\delta_L^0 = \frac{T_2 - T_1}{\max\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)} \simeq 75 \mu\text{m} \quad (5.9)$$

La flamme stœchiométrique a donc une épaisseur de  $75 \mu\text{m}$ . Cette valeur va servir à configurer le modèle de combustion turbulente d'AVBP pour les calculs de flamme 3D, en effet  $\delta_L^0$  apparaît dans le modèle TFLES (cf. section 3.3.4).

## 5.4 Calculs LES 3D des brûleurs à trois jets

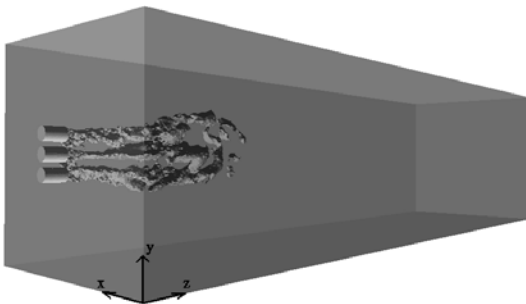
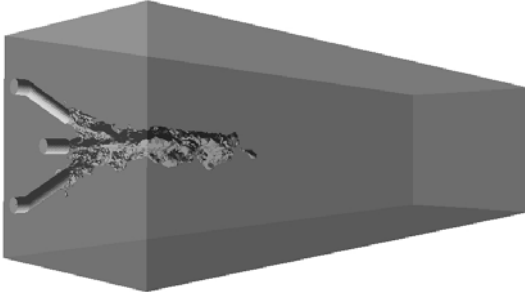
Les deux configurations de flamme turbulente présentées dans le tableau 5.2 vont maintenant être simulées. L'objectif de ces calculs est de caractériser l'effet de l'inclinaison des jets de carburant sur les propriétés de la flamme et de vérifier que les résultats obtenus sont en accord avec l'étude expérimentale de Boushaki *et al.* [13]. On utilisera le schéma cinétique Oxy-CM2 pour décrire les réactions chimiques et le modèle de flamme épaissie dynamique pour l'interaction flamme/turbulence.



## 5.4.1 Paramètres de calcul

### 5.4.1.1 Maillages

Par rapport au calcul à froid présenté au paragraphe 5.2.1, les domaines de calcul ont été rétrécis afin de diminuer la taille du maillage et de se concentrer sur les jets réactifs. La géométrie du brûleur est naturellement toujours identique à l'expérience mais on ne simule plus le four en entier : on s'intéresse seulement ici aux phénomènes qui se produisent au niveau de la flamme. Les maillages sont décrits dans le tableau 5.5.

CONFIGURATION	DOMAINE DE CALCUL	MAILLAGE
jets droits		section = 5cm*5cm 666391 tétraèdres non-structuré
jets inclinés		section = 5cm*5cm 882962 tétraèdres non-structuré

TAB. 5.5: Domaines de calcul des oxy-flammes et maillages

### 5.4.1.2 Conditions aux limites et initialisation

Les conditions aux limites sont les mêmes que celles décrites au paragraphe 5.2.1. Les débits expérimentaux sont respectés et correspondent à une richesse globale du brûleur égale à 1, c'est à dire que les réactifs sont introduits en proportions stœchiométriques. L'initialisation du calcul en configuration "jets droits" se fait à partir du champ de vitesses calculé à froid (cf. paragraphe 5.2). Les champs de tempé-

rature et fraction de mélange sont calculés en interpolant ces grandeurs entre leur valeur à l'injection et leur valeur en aval de la flamme stœchiométrique, représentée sur les figures 5.20 et 5.21. La solution initiale du calcul en configuration "jets inclinés" est une solution intermédiaire, suffisamment avancée en temps, du calcul en configuration "jets droits".

### 5.4.1.3 Paramètres du modèle de flamme épaissie dynamique

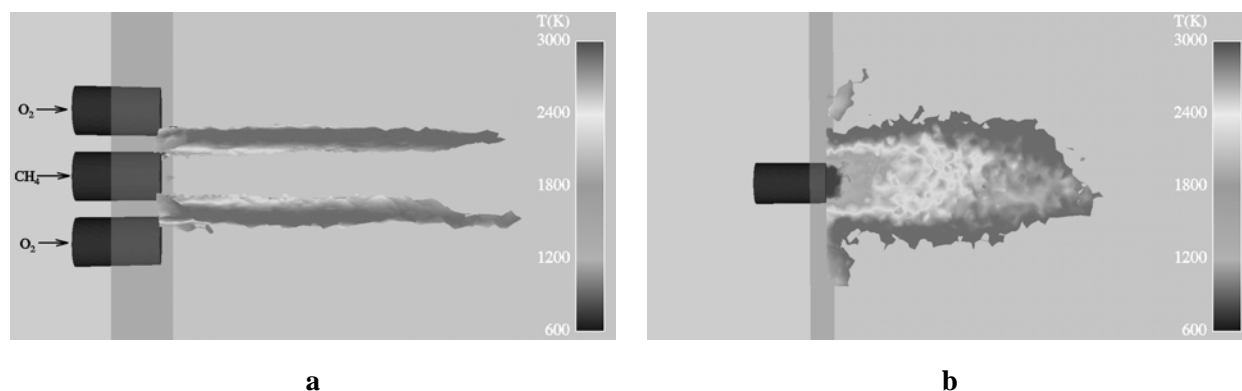
Le modèle de flamme épaissie dynamique, décrit au paragraphe 3.3.4, est utilisé pour résoudre les interactions flamme/turbulence. Les valeurs de vitesse laminaire  $s_L^0$  et épaisseur de flamme laminaire  $\delta_L^0$  servent de paramètres au modèle pour calculer la fonction d'efficacité  $E$ . L'épaississement  $F$  est spécifié par un nombre de points minimum dans le front de flamme mais l'épaississement effectif de la flamme dépend des paramètres dynamiques qui entrent en jeu dans le calcul du senseur de flamme  $S$  (cf. eq. 3.44). En pratique, on réduit l'épaississement au maximum, dans les limites de la stabilité numérique du calcul au niveau du front de flamme, afin de limiter son effet sur la diffusion des espèces. Dans les deux calculs présentés ici, on retrouve un épaississement maximal d'environ 10. Le nombre de Schmidt turbulent est égal à un pour toutes les espèces (cf. section 3.3.3).

## 5.4.2 Analyse des oxy-flammes

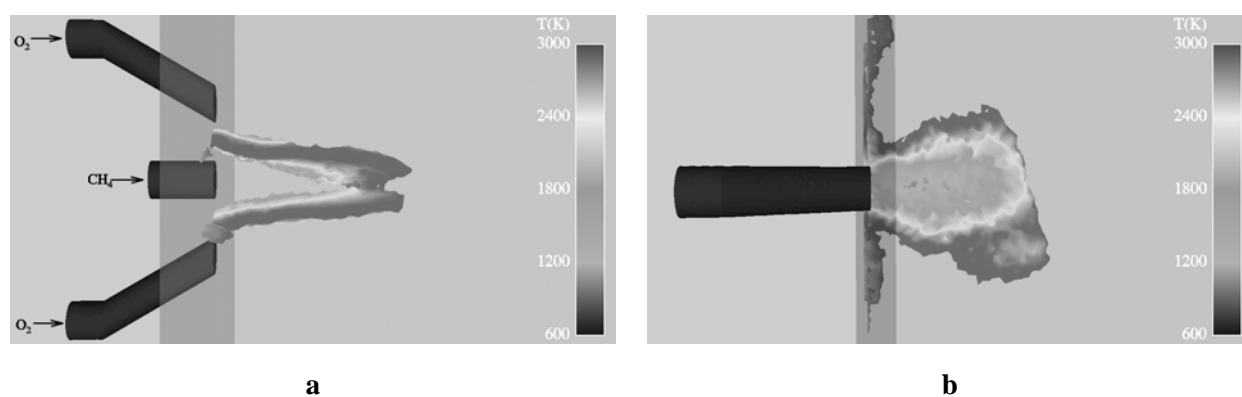
### 5.4.2.1 Topologie des flammes

Les résultats présentés dans cette partie ont été obtenus en moyennant les résultats pendant 40 ms de temps physique. Les figures 5.22 et 5.23 montrent, pour les deux configurations, un isocontour du taux de dégagement de chaleur, qui correspond à la zone de flamme, colorié par la température. Dans les deux cas, la flamme se développe en deux branches positionnées entre le jet de méthane et un jet d'oxygène. On note que la flamme est accrochée à la paroi, ce qui est en contradiction avec les résultats expérimentaux et sera discuté plus loin. La flamme issue des jets inclinés est moins longue et plus étendue latéralement que celle des jets droits, on retrouve là les effets de la configuration 1 du chapitre précédent : l'écoulement est élargi latéralement et le mélange entre les réactifs est fortement accru.

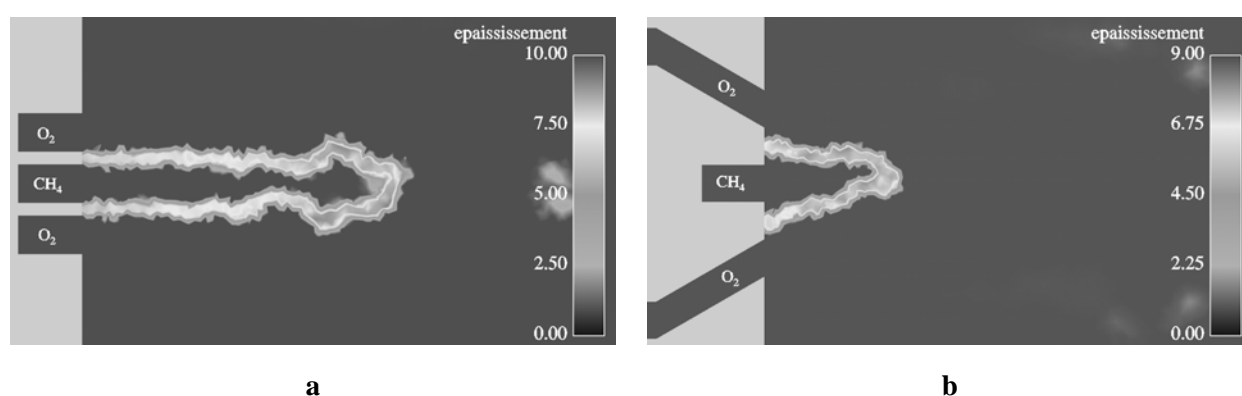
La figure 5.24 montre un champ d'épaississement et confirme que seules les zones de réaction sont épaissies ; la valeur maximum de  $F$  reste faible ( $< 10$ ).



**FIG. 5.22:** Iso-contours de taux de dégagement de chaleur coloriés par la température dans la configuration "jets droits" ; a :vue transverse ; b : vue latérale



**FIG. 5.23:** Iso-contours de taux de dégagement de chaleur coloriés par la température dans la configuration "jets inclinés" ; a :vue transverse ; b : vue latérale



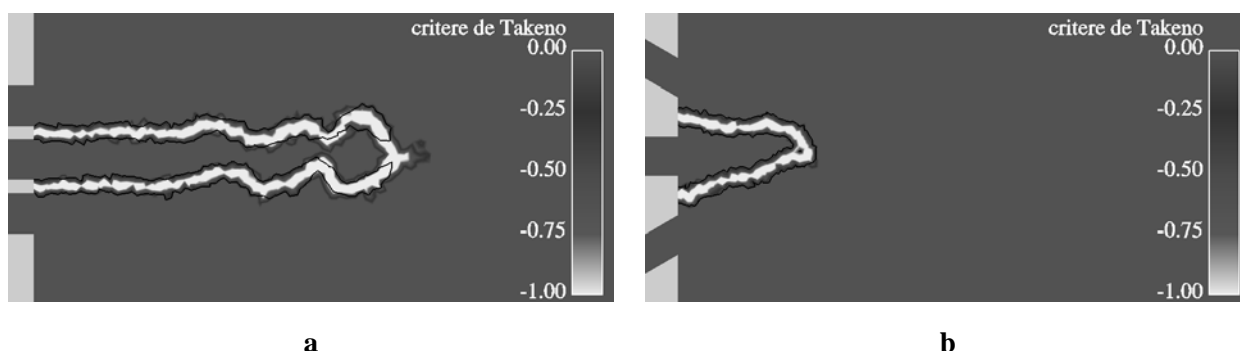
**FIG. 5.24:** Coupes transverses d'un champ instantané d'épaississement pour les configurations "jets droits" (a) et "jets inclinés" (b)

### 5.4.2.2 Régime de combustion

Pour caractériser le régime de combustion (prémélange ou diffusion), Yamashita *et al.* [109] ont introduit un indice de flamme  $G_{FO}$ , appelé aussi critère de Takeno, qui est le produit des gradients de concentration de fuel et d'oxydant :

$$G_{FO} = \nabla Y_F \cdot \nabla Y_O \quad (5.10)$$

Dans une flamme non-prémélangée, les réactifs initialement séparés diffusent vers le front de flamme et les gradients de fraction massique sont de signe opposé ; pour un régime de prémélange, la fraction massique des deux réactifs décroît au passage de la flamme et les gradients sont de même signe. C'est donc le signe de l'indice de Takeno qui renseigne sur le régime de flamme. Dans une flamme de jets séparés, cet indice peut aider à comprendre le mécanisme d'accrochage de la flamme en faisant apparaître des zones de prémélange à la base de la flamme. Dans notre cas, la flamme est accrochée à la paroi dans les deux configurations et, sur la figure 5.25, issue d'une solution instantanée, les champs d'indice de Takeno, normalisé entre -1 et 1, sont partout négatifs, ce qui montre que la flamme brûle uniquement en diffusion<sup>1</sup>. La ligne noire sur cette figure est une isoligne du taux de réaction.



**FIG. 5.25:** Coupes transverses du champ d'indice de Takeno [109] et taux de réaction pour les configurations "jets droits" (a) et "jets inclinés" (b)

### 5.4.2.3 Structure des flammes de diffusion

Pour étudier la structure chimique de la flamme de diffusion, on définit la fraction de mélange avec la formule 1.12, basée sur les éléments atomiques des espèces. En choisissant C comme élément conservé,

<sup>1</sup>Ce résultat montre aussi que le calcul LES devrait être répété avec des modèles spécifiquement développés pour les flammes de diffusion turbulentes, car TFLES n'est pas le meilleur modèle pour ces régimes. C'est cependant une première approche suffisante dans le cadre de ce travail.

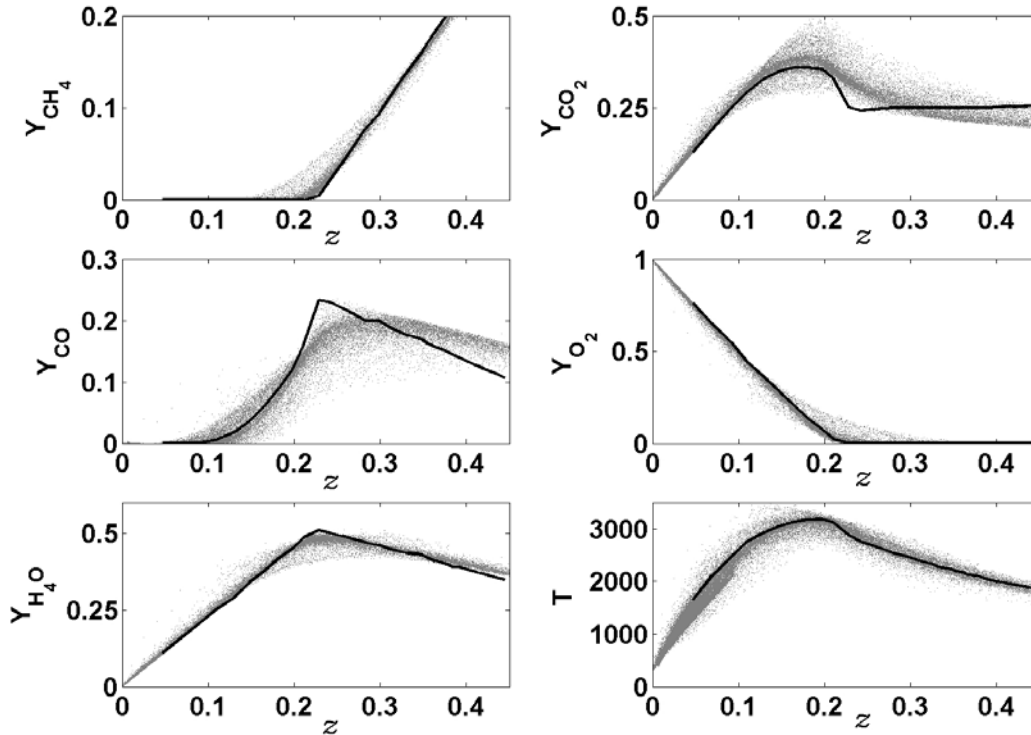
on obtient :

$$Z = Z_C = \frac{\frac{Y_{CH_4}}{W_{CH_4}} + \frac{Y_{CO}}{W_{CO}} + \frac{Y_{CO_2}}{W_{CO_2}} - \left( \frac{Y_{CH_4}}{W_{CH_4}} + \frac{Y_{CO}}{W_{CO}} + \frac{Y_{CO_2}}{W_{CO_2}} \right)_O}{\left( \frac{Y_{CH_4}}{W_{CH_4}} + \frac{Y_{CO}}{W_{CO}} + \frac{Y_{CO_2}}{W_{CO_2}} \right)_F - \left( \frac{Y_{CH_4}}{W_{CH_4}} + \frac{Y_{CO}}{W_{CO}} + \frac{Y_{CO_2}}{W_{CO_2}} \right)_O} \quad (5.11)$$

où les indices F et O désignent les valeurs à l'injection de carburant et d'oxydant, soit finalement :

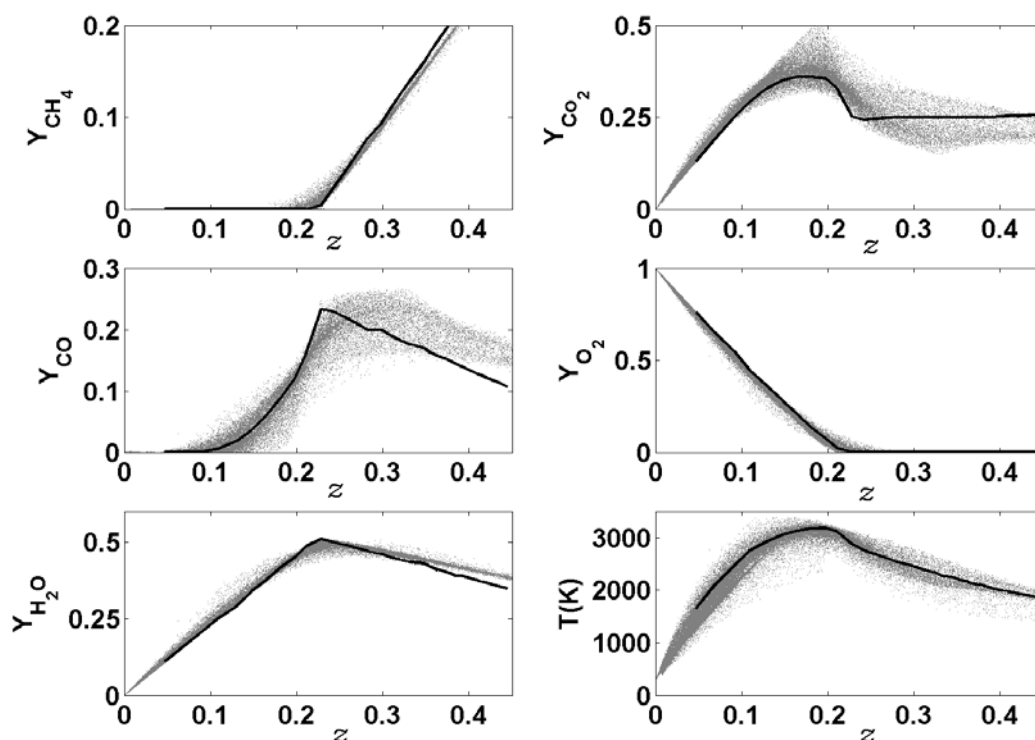
$$Z = Y_{CH_4} + \frac{16}{28}Y_{CO} + \frac{16}{44}Y_{CO_2} \quad (5.12)$$

Les diagrammes de dispersion des valeurs de fraction massique et température, extraits de solutions LES moyennées, ainsi que les courbes d'équilibre obtenues avec COSILAB, sont présentés sur les figures 5.26 et 5.27 pour les deux configurations. On ne note pas de différence nette entre les deux configurations,



**FIG. 5.26:** diagrammes de dispersion (scatter plot) et courbes d'équilibre (trait plein) des fractions massiques d'espèces et de température pour la configuration "jets droits"

puisque le calcul de la chimie et des coefficients de transport est identique dans les deux cas. Les fractions massiques de  $CH_4$ ,  $O_2$  et  $H_2O$  sont très regroupées autour des valeurs à l'équilibre. En revanche les dissociations de l'équilibre  $CO/CO_2$  de l'équation 5.9 se traduisent sur les valeurs de  $Y_{CO}$  et  $Y_{CO_2}$  par une dispersion beaucoup plus forte. Ces dissociations  $CO/CO_2$ , qui ont pour effet d'extraire de l'énergie



**FIG. 5.27:** diagrammes de dispersion et courbes d'équilibre des fractions massiques d'espèces et de température pour la configuration "jets inclinés"

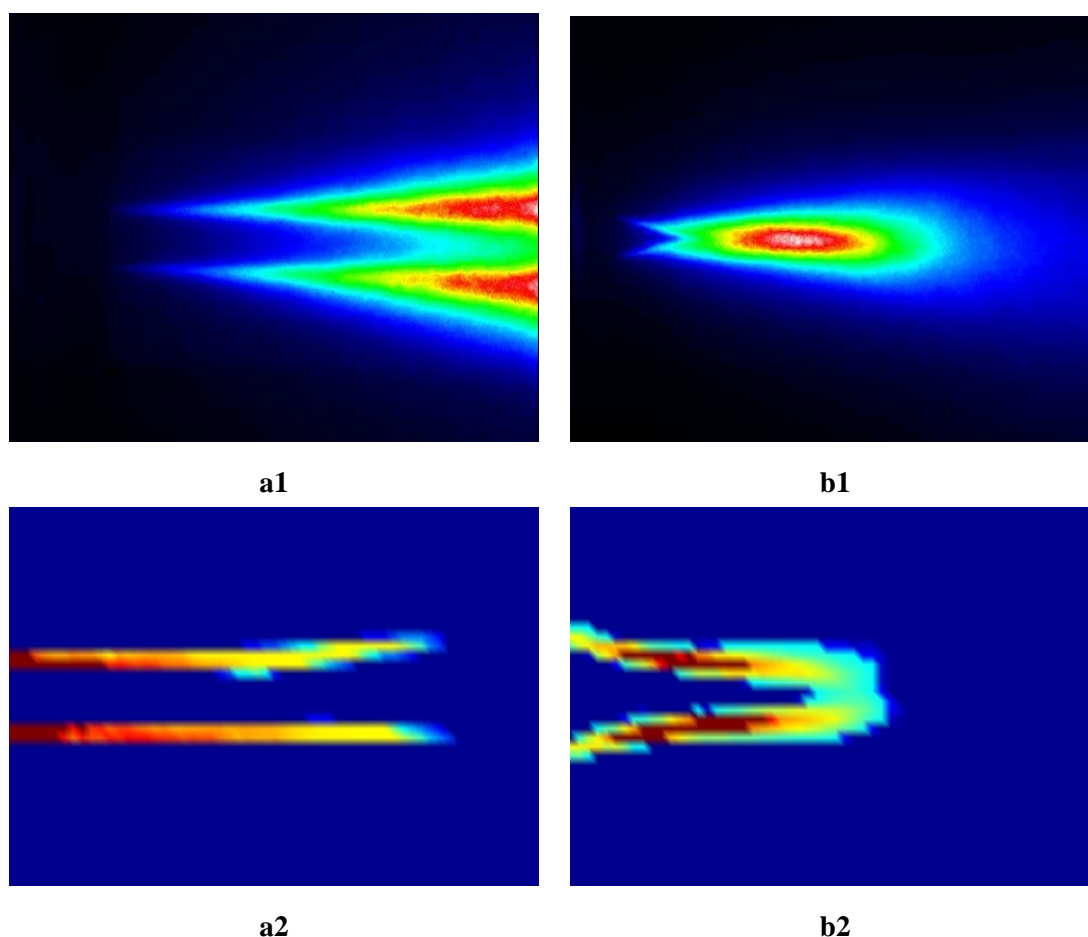
chimique dans la zone de flamme, se retrouvent aussi dans la dispersion des valeurs de température autour des courbes d'équilibre.

### 5.4.3 Effet de l'inclinaison des jets

#### 5.4.3.1 Comparaison aux résultats expérimentaux

L'effet sur la flamme de la mise en incidence des jets d'oxygène a été visualisé par Boushaki *et al.* [13] en utilisant une technique de tomographie de l'émission spontanée  $\text{OH}^*$ . La chimiluminescence du radical  $\text{OH}^*$  a lieu dans les zones de flamme, ce qui permet d'obtenir des images de la flamme intégrées sur toute la profondeur du champ d'observation. Pour obtenir le même type de visualisation à partir des champs LES, on procède de la même façon qu'avec les images strioscopiques du chapitre 4, en intégrant numériquement le champ de taux de dégagement de chaleur, qui traduit la présence de la flamme. Ces comparaisons d'expériences et de calculs sont purement qualitatives, on ne regarde ici que des effets évidents sur la position et la forme des flammes. L'intégration dans la direction  $x$  (vue

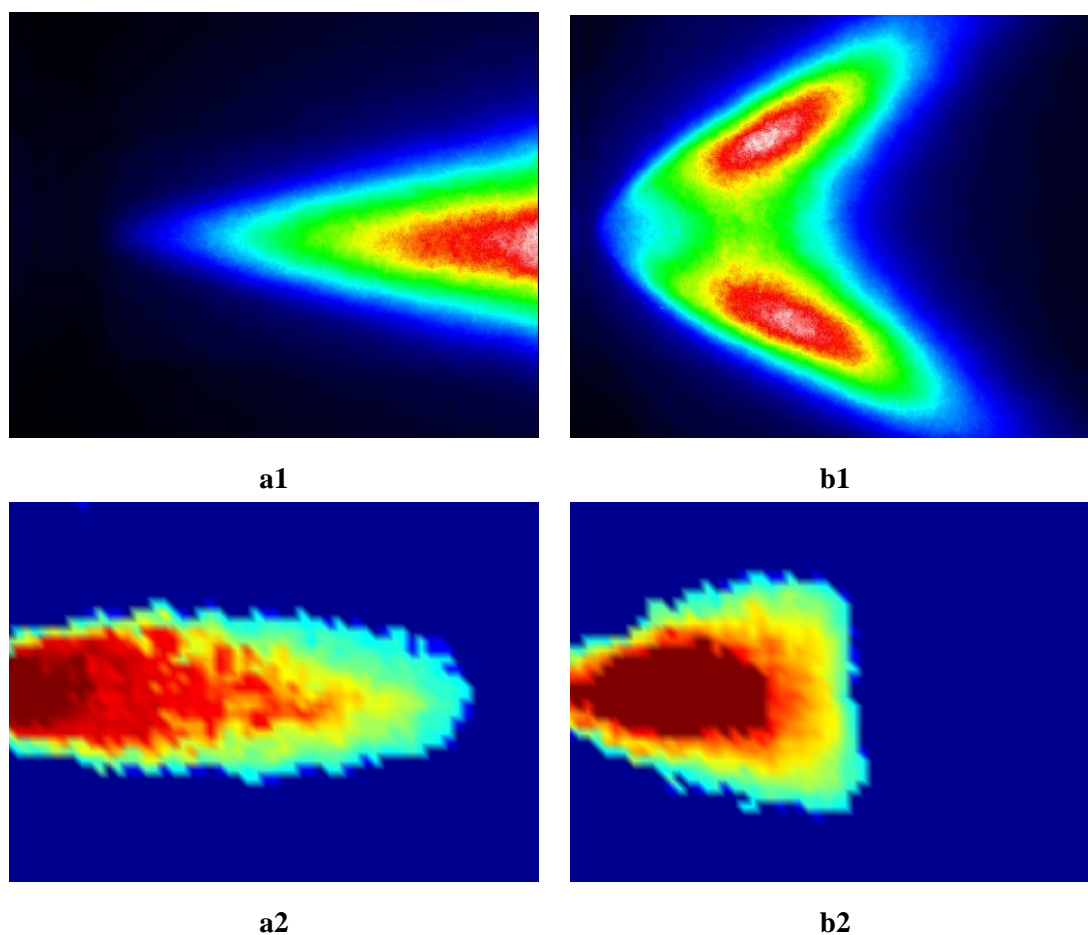
transverse) donne les images de la figure 5.28, qui montre les résultats expérimentaux et numériques dans les deux configurations. On note que la LES ne capte pas le décrochage de la flamme de la paroi amont ;



**FIG. 5.28:** Vues transverses de la flamme : comparaison des deux configurations. 1 : images tomographiques de chimiluminescence OH\* ; 2 : champs LES intégrés du taux de dégagement de chaleur ; a : configuration "jets droits" ; b : configuration "jets inclinés".

d'autres calculs ont été testés, en imposant une paroi isotherme, afin de refroidir et de déplacer vers l'aval la zone d'accroche de la flamme, sans plus de succès. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence avec les résultats expérimentaux. Tout d'abord, il est difficile de comparer l'émission OH\* avec le taux de réaction, de façon quantitative, dans des flammes de diffusion. Ensuite le schéma cinétique à deux étapes ne rend pas compte des phénomènes complexes qui entrent en jeu dans la stabilisation de flamme. De plus, comme on a vu au chapitre 4, nos simulations sont trop courtes pour prédire correctement l'entraînement dans ce type d'écoulement. Dans le cas d'une flamme, l'entraînement est responsable de la recirculation des gaz brûlés qui est le procédé de stabilisation de flamme. Aussi, une simulation plus

longue, dans un domaine aux dimensions exactes prédirait sans doute mieux le décrochage de la flamme. En revanche le raccourcissement de la flamme dû à la mise en incidence des jets d'oxygène est bien retrouvé par la LES. La figure 5.29 montre les mêmes champs, intégrés cette fois dans la direction  $y$  (vue latérale).



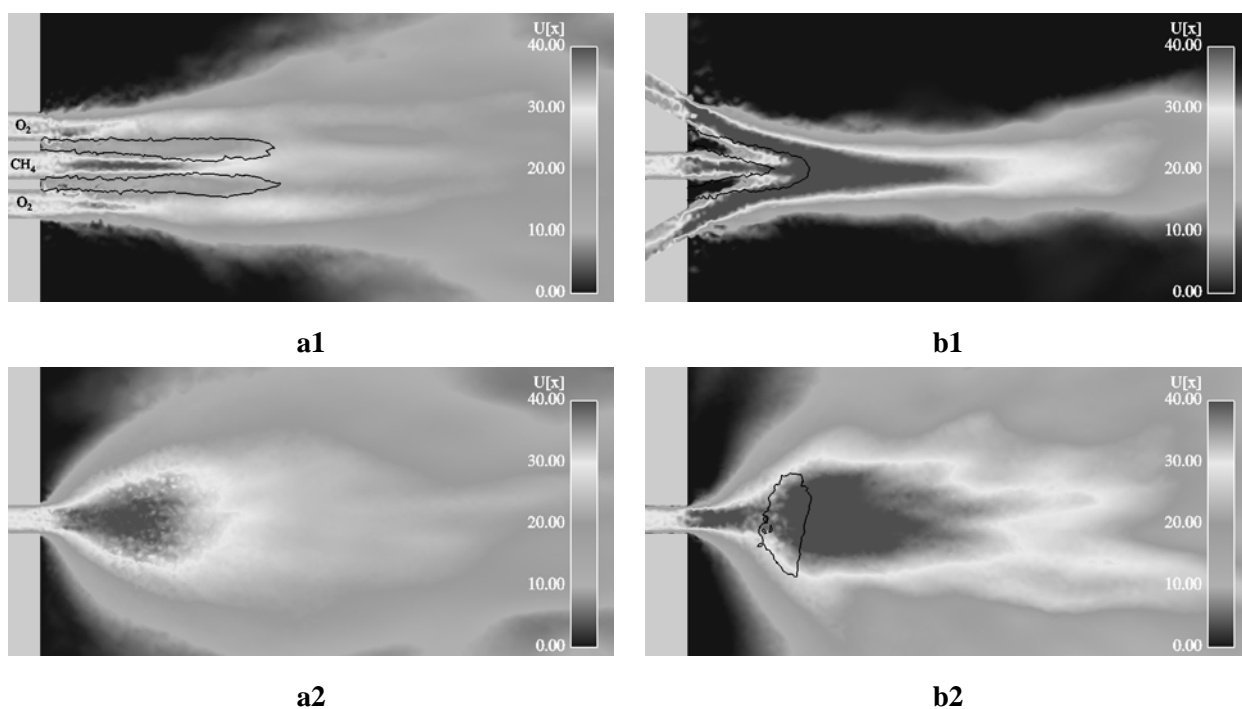
**FIG. 5.29:** Vues latérales de la flamme : comparaison des deux configurations. 1 : images tomographiques de chimiluminescence  $\text{OH}^*$ ; 2 : champs LES intégrés du taux de dégagement de chaleur; a : configuration "jets droits"; b : configuration "jets inclinés".

Sur ces vues, on note l'épanouissement latéral de la flamme lorsque les jets d'oxygène sont inclinés. Ce phénomène est retrouvé par la simulation, avec cependant moins d'intensité que dans l'expérience.



### 5.4.3.2 Évolution des champs de vitesse, température, fractions massiques, avec et sans jets inclinés

L'interaction entre le champ de vitesse et la position de la flamme est visible sur la figure 5.30 qui montre le champ de vitesse axiale et une isoligne du taux de réaction primaire dans les deux configurations. La coupe transverse a1, comparée à la figure 5.4, montre que la flamme a pour effet d'accélérer l'écoulement dans la zone centrale. La réaction a lieu autour de cette zone, où les réactifs sont mélangés par diffusion. Lorsque les jets d'oxygène sont mis en incidence (b1), on voit le résultat sur la flamme, de l'augmentation du mélange des réactifs, mise en évidence au chapitre 4 : la flamme est plus courte et se situe au centre de l'écoulement, où a lieu le mélange forcé des réactifs. Les coupes latérales a2 et b2

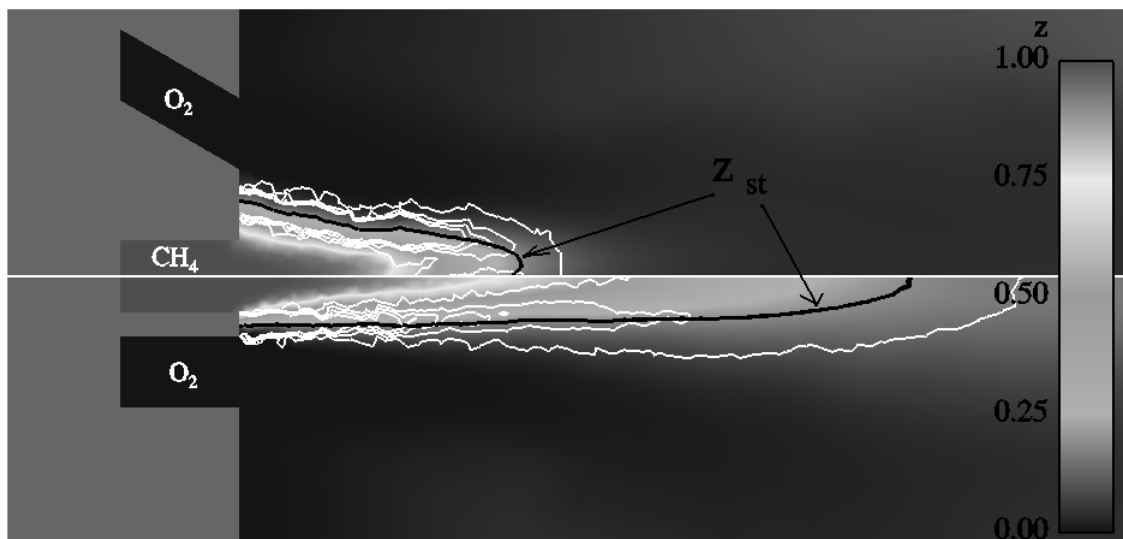


**FIG. 5.30:** Coupes du champ de vitesse axiale et isoligne de taux de réaction dans les deux configurations 1 : coupes transverses ; 2 : coupes latérales ; a : configuration "jets droits" ; b : configuration "jets inclinés".

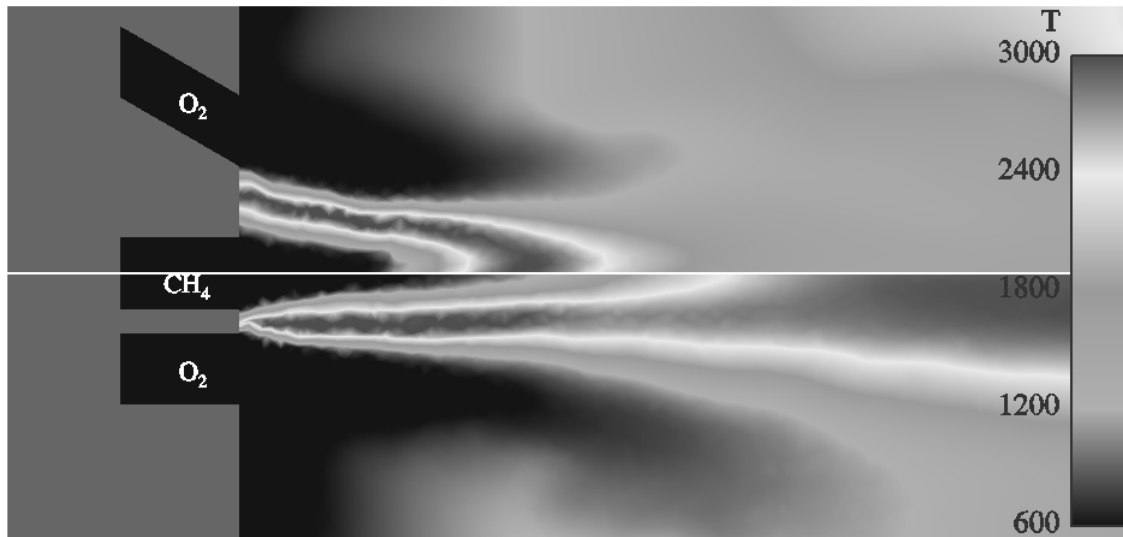
sont localisées à  $y = 0$  (au centre du jet de méthane). A ce niveau, la configuration "jets inclinés" montre une accélération et un épanouissement très nets par rapport à la configuration "jets droits". On remarque que le taux de réaction se situe exactement au niveau de l'élargissement qui résulte de l'impact des jets de réactifs et a été mis en évidence au chapitre 4. Ces observations permettent donc de confirmer les hypothèses faites au paragraphe 4.2.2.3 à partir de l'écoulement non-réactif, actionné en impact.

Sur les figures 5.31 et 5.32, sont accolés un champ moyen issu de la configuration "jets droits" (en

bas) et un autre de la configuration "jets inclinés" (en haut).



**FIG. 5.31:** Champ moyen de fraction de mélange et isolignes de taux de dégagement de chaleur dans les configurations "jets droits" (en bas) et "jets inclinés" (en haut)



**FIG. 5.32:** Champ moyen de température dans les configurations "jets droits" (en bas) et "jets inclinés" (en haut)

Le développement de la flamme autour de la ligne stoechiométrique est visible sur la figure 5.31 : la longueur de cette flamme est divisée par deux après la mise en impact des jets d'oxygène. Ceci a un effet très net sur le champ de température (cf. fig. 5.32) : avec les jets inclinés, la température décroît

rapidement en aval de la flamme. Ce type de configuration, dans un four industriel, pourrait donc servir à piloter la répartition des transferts de chaleur entre l'amont et l'aval. Plus généralement, on voit à travers ces résultats le potentiel de la LES : même si ces simulations préliminaires ne reproduisent pas parfaitement les résultats expérimentaux, elles ouvrent la voie à des analyses impossibles sans calcul et devraient permettre des études plus rapides des flammes contrôlées dans le futur.

## 5.5 Conclusion du chapitre

L'étude numérique d'une oxy-flamme issue de jets séparés à inclinaison variable a été décrite dans ce chapitre. Les simulations aux grandes échelles réalisées utilisent les modèles existants d'AVBP, hormis le modèle de cinétique chimique Oxy-CM2, à deux étapes, qui a été créé spécialement pour simplifier la réaction méthane/oxygène, et validé par des calculs de flamme laminaire monodimensionnelle. L'analyse des résultats montre que la flamme, dans les deux configurations, brûle en régime de diffusion pure ; on retrouve par le calcul des phénomènes propres à la configuration "jets en impact" du chapitre précédent (formation d'un jet unique élargi latéralement, amélioration du mélange) et l'effet de ces phénomènes sur la flamme ont été décrits : flamme courte, large et intense. La comparaison avec les résultats expérimentaux de Boushaki *et al.* [13] montre que nos simulations rendent bien compte des effets de l'inclinaison des jets d'oxygène mais que la stabilisation de la flamme en aval de la paroi n'est pas retrouvée. En calculant plus précisément l'entraînement des gaz brûlés, les résultats pourraient sans doute être améliorés et le calcul d'autres propriétés de la flamme ayant un intérêt industriel, telles que les émissions, pourrait être envisagé. En pratique, la LES confirme ce que les expériences du CORIA avaient montré : la mise en incidence des jets est un type de contrôle très puissant sur les flammes de brûleurs multi-jets. Dans la configuration expérimentale du CORIA, les jets sont orientés pour entrer en impact mais aucune donnée quantitative ne concerne le cas de jets actionnés en parallèles. Il se trouve que l'application des actionneurs en parallèle est le contrôle de trajectoire et que ce sujet intéresse directement Air Liquide. C'est donc chez Air Liquide que s'est fait le test "actionneurs en parallèle" et c'est l'objet du chapitre 6.

## Chapitre 6

# Application industrielle et valorisation

Comme il a été vu au chapitre 1, la première application envisagée des jets de réactifs à incidence variable, est un brûleur qui permette de contrôler la direction du transfert de chaleur vers une charge. La configuration "bi-jet actionné en parallèle", étudiée au chapitre 4 remplit cette fonction, elle est donc à la base de la conception du brûleur DYNAMICAL, présenté dans ce chapitre. Les tests industriels ont été conduits pendant cette thèse, au Centre de Recherche Claude-Delorme d'Air Liquide, au cours d'un séjour de trois mois qui a permis de définir la configuration et les actionneurs. Ces tests ont servi à vérifier la capacité du brûleur DYNAMICAL, muni du système d'actionneurs développé à l'IMFT, à produire une flamme d'inclinaison variable. C'est l'option "contrôle en parallèle" qui a été choisie pour ces essais afin de contrôler l'inclinaison des jets dans la chambre. Les effets de cette inclinaison, en termes de puissance transférée à une charge et de rendement thermique, ont été mesurés dans le Four ALICE du CRCD, qui sert aux tests de tous les brûleurs Air Liquide. Ce chapitre montre la capacité des actionneurs à modifier la trajectoire de flamme, les transferts thermiques, et donc à être intégrés dans des procédés industriels de contrôle des fours.

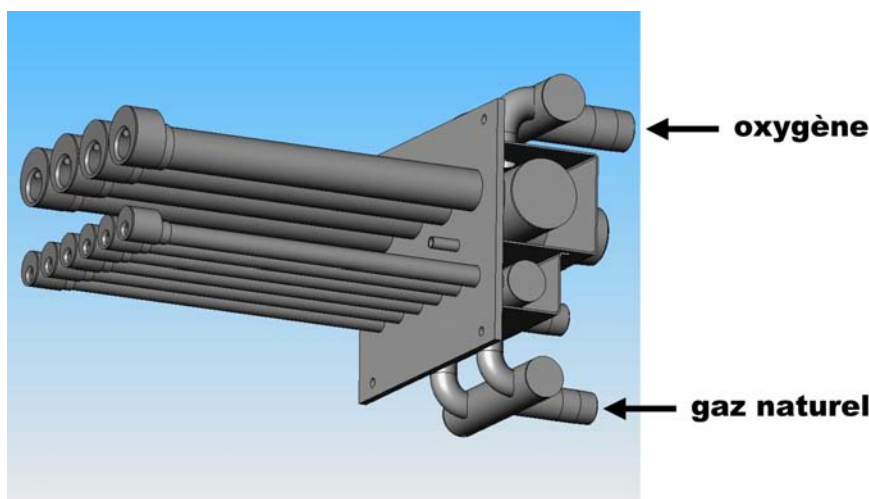
### 6.1 Conception du brûleur DYNAMICAL

Le brûleur DYNAMICAL a été développé au CRCD fin 2004. Destiné au procédé de deuxième fusion de l'aluminium, son cahier des charges était le suivant :

- brûleur gaz naturel / oxygène
- puissance nominale : 1 MW
- plage de fonctionnement : de 0.5 à 1.5 fois la puissance nominale

- flamme plate
- faibles émissions de  $\text{NO}_x$  ( $\sim 100$  ppm)
- contrôle dynamique de l'incidence de la flamme : 0 à  $30^\circ$

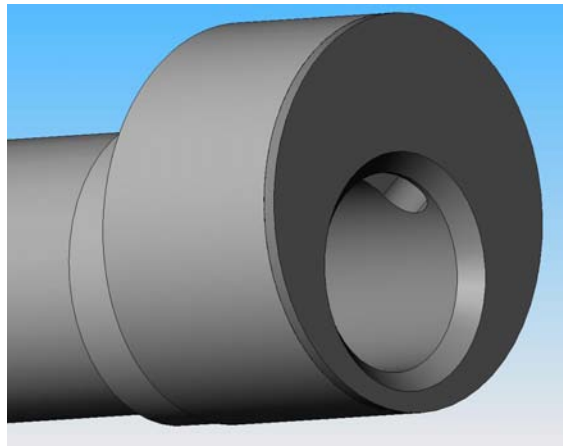
Ces critères étant presque tous remplis par le brûleur ALGLASS FC<sup>TM</sup> présenté au chapitre 1, celui-ci a été choisi comme point de départ pour la conception du DYNAMICAL et muni d'actionneurs pour le contrôle d'incidence de la flamme. Le caractère dynamique du contrôle, c'est à dire sa capacité à opérer en boucle fermée selon un paramètre transmis en permanence au système de contrôle de la flamme, est assuré grâce à la technologie retenue pour les actionneurs : ceux-ci étant de type "fluide", une vanne pilotée de régulation du débit suffit à assurer le contrôle. Afin de profiter de ce projet pour pousser l'innovation, une flamme plus large et plus plate que dans le cas du brûleur ALGLASS FC<sup>TM</sup> était voulue. Pour cela, il fallait élargir les sections d'injection des réactifs, tout en gardant des buses circulaires, sur lesquelles la technologie des actionneurs avait été testée à l'IMFT. La solution fut d'augmenter le nombre d'injecteurs : le brûleur DYNAMICAL comprend donc six injecteurs de gaz naturel et quatre d'oxygène, il est représenté sur la figure 6.1. La partie amont du brûleur est composée du système de répartition des débits de réactifs entre les différentes cannes d'injection et les actionneurs.



**FIG. 6.1:** Dessin du corps du brûleur DYNAMICAL

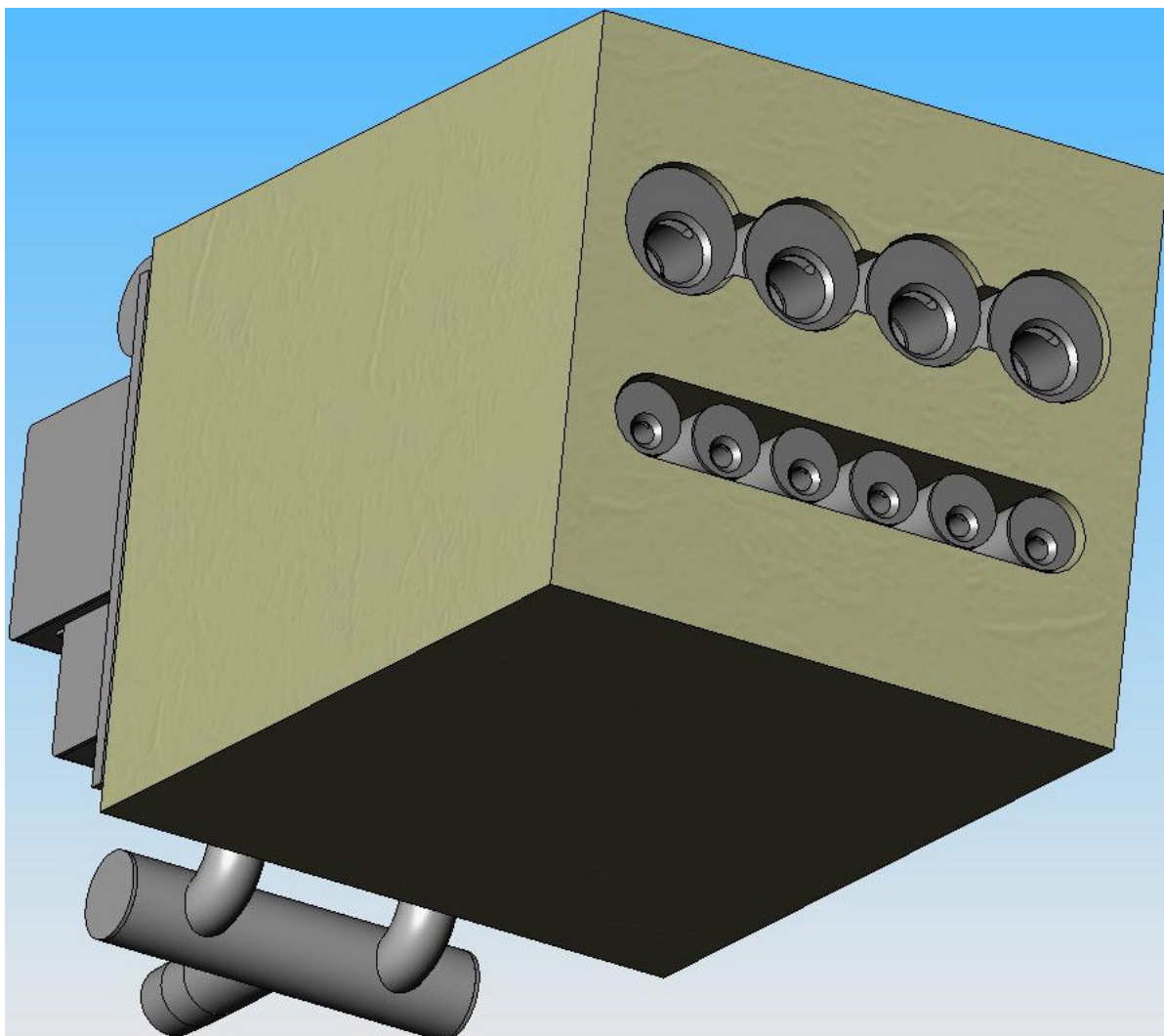
Chacun des dix injecteurs est équipé d'un actionneur, le dispositif choisi pour dévier la flamme est un actionneur de type "fente" tel que celui présenté au paragraphe 2.1. Le débit qui s'écoule dans l'actionneur est prélevé en amont sur le débit total qui entre dans l'injecteur, ainsi la puissance totale du

brûleur est conservée, quel que soit le régime de contrôle, défini par le même paramètre  $c$  qu'au chapitre 4 (section 4.1.1). Comme il a été vu au chapitre 4, la particularité de ce type d'actionneur est de conserver au jet principal une structure compacte et une direction précise, contrairement aux actionneurs-jets, plus ponctuels, qui ont pour effet de désorganiser voire d'éclater le jet principal. Afin de garantir un effet fort de l'actionneur sur les jets de réactifs, la longueur de guidage des écoulements actionneurs vers le jet principal a été augmentée dans des embouts qui garantissent un impact de l'écoulement actionneur perpendiculaire au jet principal (figure 6.2).



**FIG. 6.2:** Embout de guidage de l'écoulement actionneur

Finalement le corps métallique du brûleur est inséré dans un bloc-ouvreau en brique réfractaire qui permet d'installer le brûleur dans un four et de protéger ses parties métalliques des hautes températures. Un schéma du brûleur complet est présenté sur la figure 6.3. On voit que l'orifice rectangulaire où sont insérés les injecteurs de gaz naturel préserve un espace qui sert éventuellement à faire passer un "gainage" d'oxygène, assurant l'accrochage de la flamme.



**FIG. 6.3:** Dessin complet du brûleur DYNAMICAL

## 6.2 Four de test "ALICE"

Lors d'un test préliminaire de fonctionnement du brûleur sur une plate-forme extérieure, il a été vérifié que le brûleur DYNAMICAL fonctionnait à la puissance voulue en délivrant une flamme à incidence variable. Pour les tests quantitatifs, le brûleur a été placé dans le four pilote "ALICE" du CRCDD. Ce four sert à tester des brûleurs jusqu'à une puissance de 2MW, ses parois en fibre céramique réfractaire peuvent être chauffées jusqu'à 1600°C. Le four ALICE est représenté sur la figure 6.4. La chambre de combustion fait 6.0 m de long et a une section transversale rectangulaire de 1.5 m par 2.0 m. Ces di-

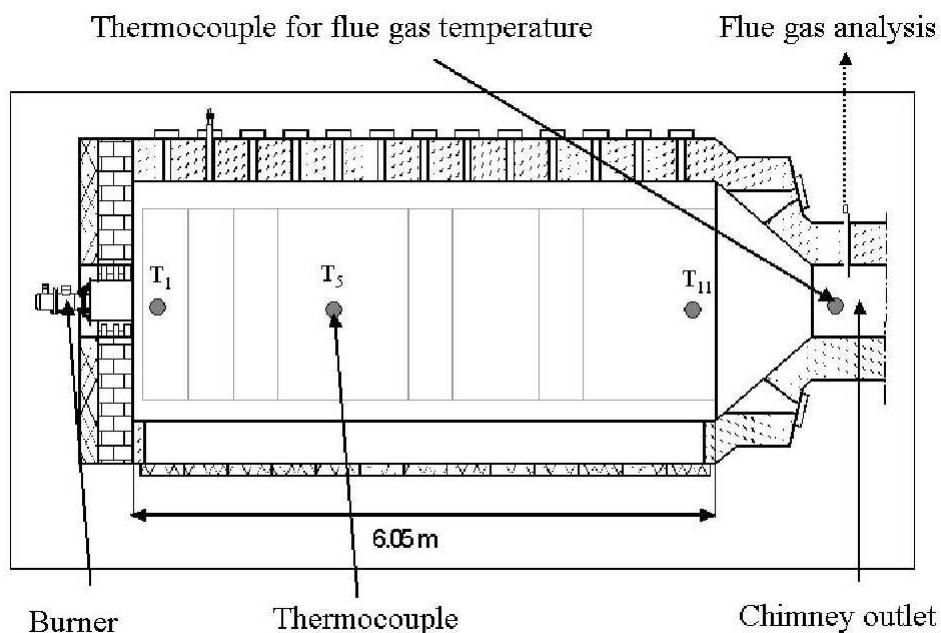


FIG. 6.4: Four pilote "ALICE" du CRCD

mensions permettent de négliger les effets de confinement de la flamme, tout en permettant l'interaction avec les gaz brûlés. On dispose d'un suivi visuel de la flamme sous plusieurs angles, grâce à des caméras vidéos installées dans les parois latérales et au fond du four. La température interne est mesurée en permanence par onze thermocouples disposés dans le toit du four. L'extraction de la chaleur est contrôlée par la sole du four, composée de plaques de carbure de silicium, refroidies par une circulation d'eau. Ces segments de refroidissement séparés servent à effectuer des mesures calorimétriques locales du transfert de chaleur à la sole dû au brûleur. Cette sole représente donc la charge à chauffer d'un procédé industriel. Un thermocouple et des analyseurs de gaz en sortie du four permettent de déterminer la composition et la température des gaz évacués. La cheminée de sortie a une ouverture réglable, pilotée électriquement, grâce à laquelle on peut faire varier la pression à l'intérieur du four et minimiser les entrées d'air. Des ouvertures à commande pneumatique sont placées sur les parois latérales et permettent de faire passer des instruments tel que le faisceau d'un pyromètre laser pour mesurer la température au nez du brûleur. Toute cette instrumentation est reliée à un poste de commande et d'acquisition de données entièrement robotisé. Enfin, tout dysfonctionnement du four ou du brûleur (température excessive, extinction de la flamme...) entraîne automatiquement une fermeture des vannes d'arrivée des réactifs et l'arrêt du brûleur.

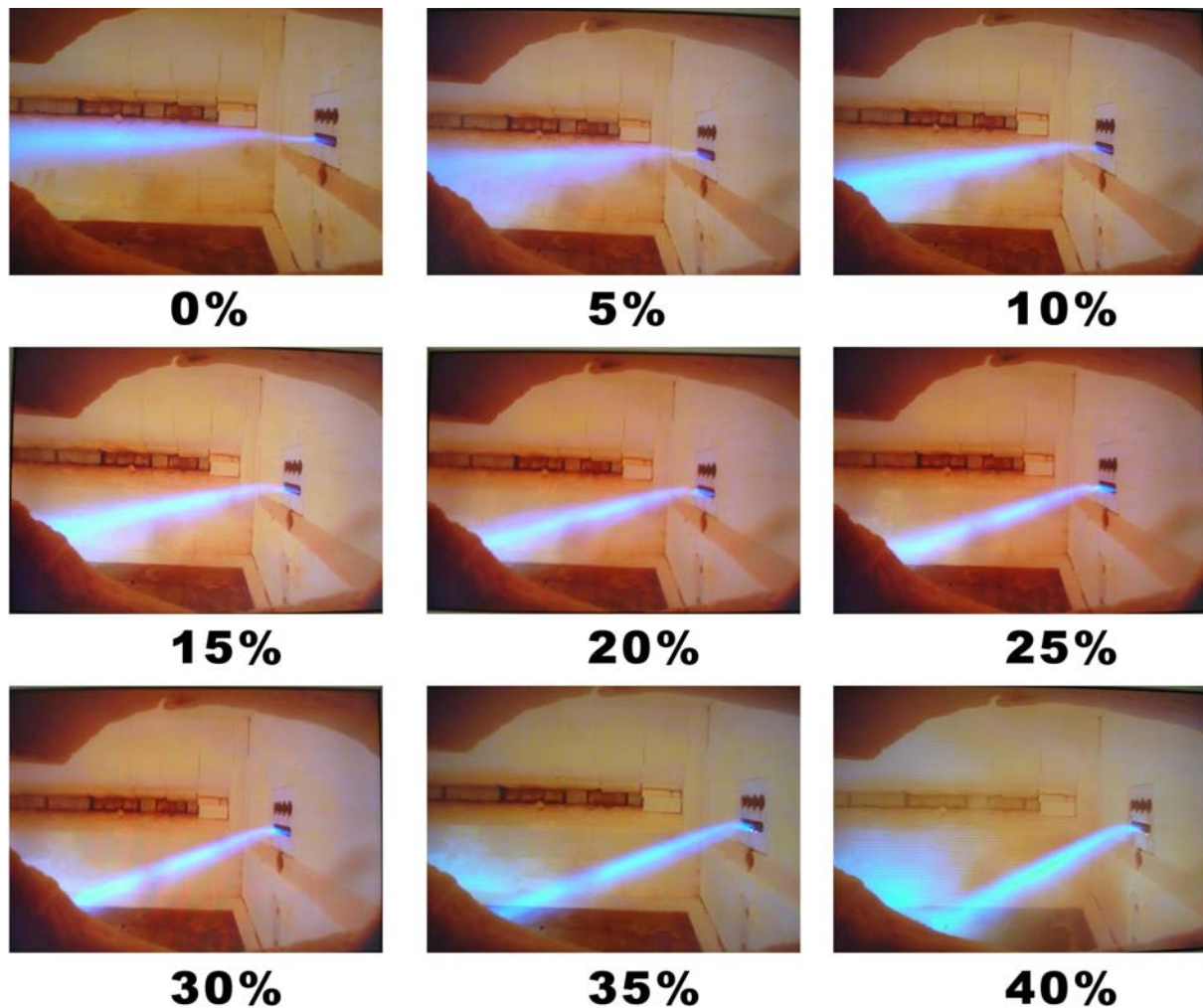


### 6.3 Performances du brûleur DYNAMICAL

Les tests dans le four ALICE ont été effectués en Avril 2005. L'objectif était de mesurer pour différents régimes de contrôle :

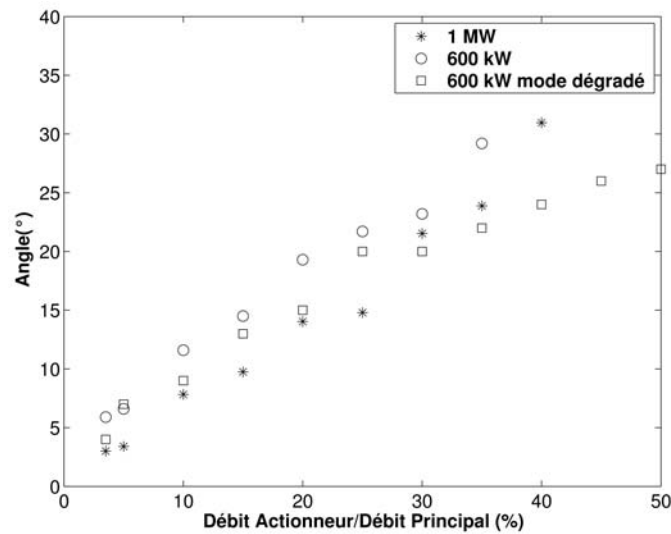
- l'angle d'incidence la flamme
- le profil de transfert de chaleur le long de la sole du four
- le transfert thermique total sur la sole
- le rendement thermique du brûleur

Pour chaque injecteur, le paramètre de contrôle est le rapport entre le débit de réactif dans l'actionneur et le débit dans le jet principal. Ce paramètre, une fois fixé, est le même dans tous les injecteurs (de carburant et d'oxygène). Par exemple, lorsque le régime de contrôle est fixé à dix pour cent, cela signifie que dans chacun des dix injecteurs du brûleur DYNAMICAL, dix pour cent du débit passe dans l'actionneur et quatre-vingt-dix pour cent dans le jet principal. La première caractéristique du brûleur, l'angle d'incidence de la flamme, est déterminée directement sur des images de la flamme, telles que celles présentées sur la figure 6.5, où le brûleur fonctionne à 1 MW.



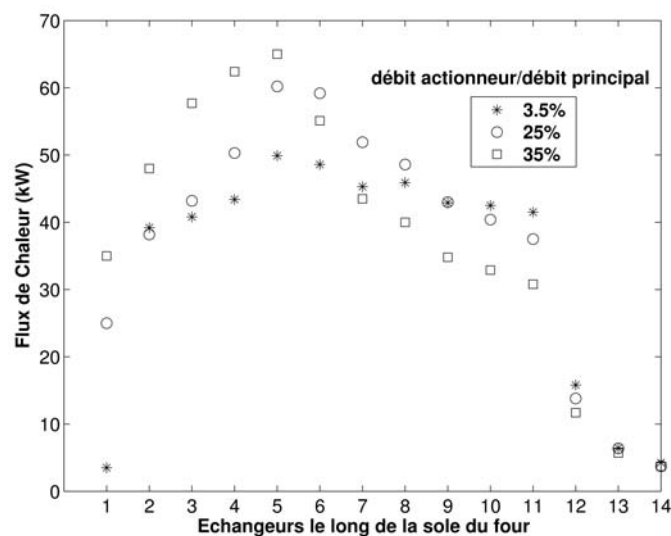
**FIG. 6.5:** Visualisation de la flamme DYNAMICAL à différentes valeurs du régime de contrôle

Cet angle varie de façon quasi-linéaire avec le régime de contrôle, comme le montre le figure 6.6 et ce phénomène ne dépend pas de la puissance du brûleur (donc des débits de réactifs). Ces résultats corroborent ceux obtenus à froid à l'IMFT, présentés au chapitre 4. Un mode "dégradé" qui consiste à n'actionner que les injecteurs d'oxygène a aussi été testé et les angles obtenus sont similaires.



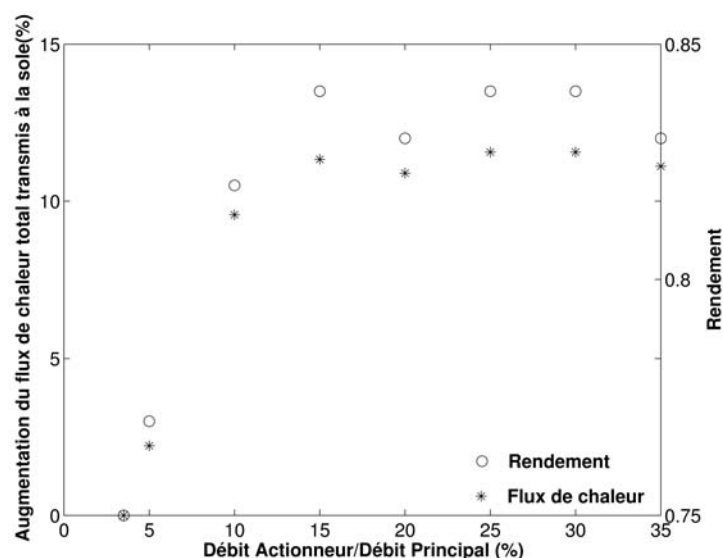
**FIG. 6.6:** Angle d'incidence de la flamme de DYNAMICAL en fonction du régime de contrôle

Les mesures calorimétriques sur les quatorze extracteurs disposés axialement sur la sole du four permettent de tracer le profil de transfert de chaleur à une charge en fonction du régime de contrôle (cf Fig. 6.7). On voit clairement un déplacement vers l'amont du pic de transfert de chaleur lorsqu'on augmente le contrôle.



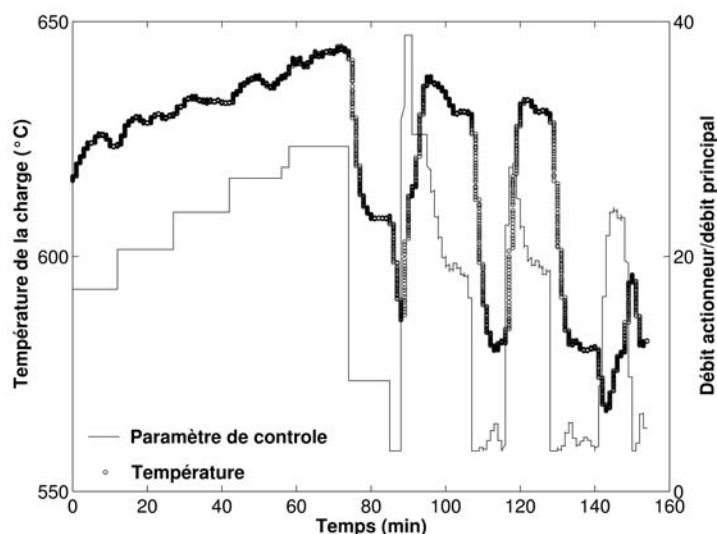
**FIG. 6.7:** Profil de transfert de chaleur à la sole pour différents régimes de contrôle

De façon plus globale, l'énergie totale transmise à la charge, et donc le rendement thermique du brûleur, sont augmentés par la mise en incidence de la flamme sur la charge. Ceci est illustré sur la figure 6.8.



**FIG. 6.8:** Augmentation du flux total de chaleur et du rendement du brûleur avec le régime de contrôle

Les tests prouvent donc que le brûleur conçu permet une mise en incidence de la flamme sur une charge ce qui entraîne une vitesse de chauffe améliorée dans les procédés métallurgiques (cf chapitre 1). L'originalité du brûleur DYNAMICAL est de pouvoir adapter cette inclinaison de flamme en fonction du déroulement du procédé de la chauffe. Une première démonstration a été faite au CRCD à l'issue des tests. Une boucle de régulation a été réalisée entre les vannes de débit des réactifs qui règlent le paramètre de contrôle (rapport des débits actionneur/principal) et une température mesurée à l'intérieur du four, qui sert de consigne. La figure 6.9 montre que le régime de contrôle du brûleur est effectivement piloté par la température.



**FIG. 6.9:** Augmentation du flux total de chaleur et du rendement du brûleur avec le régime de contrôle

Plus particulièrement, la première partie de la courbe montre que le montage régulateur, en l'absence de consigne, cherche à pousser l'incidence de la flamme. La température agit ici comme une consigne d'alarme : au delà d'une valeur critique, elle a pour effet de faire chuter le paramètre de contrôle.

Ces résultats très satisfaisants et encourageants pour les applications futures du brûleur DYNAMICAL à divers procédés industriels, ont permis au groupe Combustion du CRCD de faire breveter par Air Liquide la technologie de contrôle de l'incidence de flamme employée sur le DYNAMICAL [46]. La première page de ce brevet est présentée dans l'annexe B.

## 6.4 Conclusion du chapitre

La technologie des actionneurs-fentes, inventée et testée à l'IMFT en conditions non-réactives, a été implantée avec succès sur un brûleur industriel. Le but recherché, la déviation de la flamme, est atteint : les angles d'incidence sont conformes à ceux obtenus dans l'étude à froid et prévus par le cahier des charges. De plus, la mise en incidence de la flamme permet bien de jouer sur la répartition du flux de chaleur à une charge et engendre une augmentation nette du rendement du brûleur. Enfin la technologie des actionneurs et le comportement de la flamme soumise au contrôle, permettent de piloter cette flamme en boucle fermée, ce qui ouvre à ce type de brûleur un vaste champ d'applications.

## Conclusion et perspectives

Un nouveau système de contrôle de l'injection des réactifs dans un oxy-brûleur à jets séparés est présenté dans ce travail. Il découle du besoin industriel de modifier en temps réel et sans modification de la géométrie des brûleurs, la trajectoire et d'autres propriétés de la flamme dans les procédés de chauffe. Ce système a été conçu et étudié en laboratoire, sur des jets non-réactifs isolés, puis sur des couples de jets. Il a ensuite été testé à l'échelle industrielle ; sa réalisation a fait intervenir progressivement des phénomènes de complexité croissante.

Un actionneur fluide a été conçu afin de dévier un jet gazeux axisymétrique, qui est l'écoulement de base dans les brûleurs concernés. Cet actionneur a pour effet de modifier la trajectoire du jet et d'améliorer son mélange avec l'air ambiant, tout en lui conservant une structure compacte. Muni de cet actionneur, le jet peut être dirigé instantanément avec précision. Un bi-jet, c'est à dire un écoulement issu de deux injecteurs parallèles, munis de ces actionneurs, a été instrumenté sur le banc d'essais aérodynamiques de l'IMFT. Deux versions de l'interaction du bi-jet ont été étudiées : l'une où les jets sont mis en impact, l'autre où ils sont déviés dans des directions parallèles. Il a été vu que la première configuration améliorerait fortement le mélange des gaz injectés et donnait naissance à un nouveau jet, de section elliptique, présentant de forts niveaux de turbulence. La deuxième configuration conduit à une déviation importante de l'écoulement global et favorise son mélange avec l'air ambiant, d'où son intérêt potentiel dans les systèmes de recirculation des gaz brûlés. Les résultats de cette étude d'écoulements non-réactifs ont été retrouvés par des simulations aux grandes échelles (LES), réalisées avec le code de calcul AVBP. En particulier la LES a montré sa capacité à prédire la dynamique de la turbulence dans le bi-jet. Il a été montré que des calculs plus longs seraient nécessaires pour rendre compte des phénomènes d'entraînement, responsables du mélange avec l'air ambiant.

Une fois terminée l'étude "à froid", des calculs de flamme ont été entrepris. Les résultats expérimentaux du CORIA, sur un oxy-brûleur de 25kW, installé dans un four instrumenté, ont été utilisés comme référence pour les simulations. Le brûleur comprend un jet central de gaz naturel et deux jets latéraux

d'oxygène à incidence variable, ce qui permet de les mettre en impact et retrouver ainsi une configuration du même type que dans l'étude à froid. Les calculs utilisent le modèle de flamme épaissie dynamique d'AVBP ; le schéma cinétique réduit, Oxy-CM2, a été développé spécifiquement pour simplifier la chimie de la réaction méthane/oxygène. Ce schéma à deux étapes a été validé par des calculs de flamme 1D réalisés avec le code COSILAB. Les simulations aux grandes échelles ont montré que la flamme brûle dans un régime de diffusion pure. Sous l'effet de la mise en incidence des jets d'oxygène, la flamme calculée présente un comportement similaire aux flammes expérimentales : sa longueur diminue, elle s'aplatit dans une direction et est étirée simultanément dans l'autre direction. En revanche, l'accrochage de la flamme, qui a lieu en aval de la paroi du four, n'est pas retrouvé par les calculs, qui montrent une flamme stabilisée sur la paroi. Pour améliorer les résultats de LES dans les calculs de brûleurs à jets séparés et se doter d'un véritable outil numérique de développement, ce travail a montré que la prise en compte des phénomènes de recirculation des gaz brûlés était nécessaire. Pour cela, des méthodes numériques permettant de simuler un temps physique plus long seraient souhaitables. Un schéma de discrétisation implicite des équations permet de s'affranchir de la condition CFL et autoriserait des pas de temps plus longs ; des méthodes couplées RANS-LES existent aussi et pourraient autoriser à calculer des grands domaines tout en gardant une description précise de la dynamique turbulente des jets. Enfin, les méthodes récentes de tabulation de la cinétique chimique ([29, 90]) permettent une prise en compte d'un grand nombre d'espèces à un coût numérique réduit et seraient particulièrement adaptées aux flammes de diffusion pure, issues des brûleurs à jets séparés.

L'application industrielle des études académiques s'est faite lors d'un séjour de trois mois au CRCDD d'Air Liquide. Reprenant l'idée de la configuration "jets parallèles" de l'étude à froid, afin de pouvoir faire varier la trajectoire de flamme, le brûleur DYNAMICAL a été conçu et comporte dix injecteurs munis d'actionneurs (six de gaz naturel et quatre d'oxygène), pour une puissance nominale de 2 MW. Les objectifs fixés pour ce brûleur ont été atteints : les variations d'incidence de la flamme ont une forte amplitude et conduisent à une augmentation nette du rendement. Ces bons résultats ont conduit au dépôt d'un brevet qui reprend le principe de la flamme vrillée par des actionneurs [28] ainsi que celui des actionneurs-fente qui dévient l'écoulement. L'utilisation conjointe de ces deux types de contrôle sur un même brûleur multi-jets ouvre un grand nombre de perspectives de développement. Aujourd'hui, une nouvelle étude académique, issue d'un partenariat Air Liquide-IMFT, est lancée et vise à utiliser les actionneurs pour contrôler l'atomisation d'un jet liquide de fuel lourd. La souplesse de mise en oeuvre des actionneurs permet ainsi d'imaginer des améliorations en termes de rendement, stabilité de la flamme et faibles émissions, pour la plupart des procédés industriels de chauffe.

# Bibliographie

- [1] G.N. Abramovich. *The theory of turbulent jets*. The MIT Press Classics, 1963.
- [2] F.S. Alvi, P.J. Strykowski, A. Krothapalli, and D.J. Forliti. Vectoring thrust in multiaxes using confined shear layers. *Journal of Fluids Engineering*, 122 :3–13, 2000.
- [3] E.A. Anderson and R.E. Spall. Experimental and numerical investigation of two-dimensional parallel jets. *Journal of Fluids Engineering*, 123 :401–406, 2001.
- [4] R.A. Antonia, B.R. Satyaprakash, and A.K.M.F. Hussain. Measurements of dissipation rate and some other characteristics of turbulent plane and circular jets. *Physics of Fluids*, 23(4) :695–700, 1980.
- [5] S. Ashforth-Frost and K. Jambunathan. Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet. *International Communications on Heat and Mass Transfer*, 23(2) :155–162, 1996.
- [6] G.K. Batchelor and A.E. Gill. Analysis of the stability of axisymmetric jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 14 :529–551, 1962.
- [7] M. Baum, T. Poinsot, and D. Thévenin. Accurate boundary conditions for multicomponent reactive flows. *Journal of Computational Physics*, 116 :247–261, 1994.
- [8] M.W. Bettridge, R.E. Spall, and B.L. Smith. Aerodynamic jet vectoring using steady blowing and suction. In AIAA 2004-0921, editor, *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV*, 2004.
- [9] B.J. Boersma, G. Brethouwer, and F.T.M. Nieuwstadt. A numerical investigation on the effect of the inflow conditions on the self-similar region of a round jet. *Physics of Fluids*, 10(4) :899–909, 1998.
- [10] C. Bogey and C. Bailly. Large eddy simulations of transitional round jets : influence of the Reynolds number on flow development and energy dissipation. *Physics of Fluids*, 18 :1–14, 2006.



- 
- [11] P. Boudier, S. Henriot, T. Poinso, and Baritaud T. A model for turbulent flame ignition and propagation in spark ignition engines. In The Combustion Institute, editor, *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*, pages 503–510, 1992. GB.
- [12] T. Boushaki, J.C. Sautet, and B. Labegorre. Etude de l’effet d’actionneurs dynamiques sur le transfert thermique et les caractéristiques d’oxy-flammes d’un brûleur à jets séparés. Rapport interne CORIA-AIR LIQUIDE, Octobre 2004.
- [13] T. Boushaki, J.C. Sautet, L. Salentey, and B. Labegorre. The behaviour of lifted oxy-fuel flames in burners with separated jets. *International Communications on Heat and Mass Transfer*, 34(1) :8–18, 2007.
- [14] H.H. Bruun. *Hot-Wire Anemometry : Principles and Signal Analysis*. Oxford University Press, 1995.
- [15] M. Cathonnet. Advances and challenges in the chemical kinetics of combustion. In *Proceedings of the 2003 European Combustion Meeting*, Orléans, France, 2003.
- [16] S.H. Chuang and Z.C. Hong. Diffusion flame analysis of twin plane jets via a kinetic theory approach. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 13 :341–354, 1991.
- [17] O. Colin. *Simulation aux Grandes Echelles de la Combustion Turbulente Prémélangée dans les Statoréacteurs - TH/CFD/00/21*. PhD thesis, Institut National Polytechnique, 2000.
- [18] O. Colin. A finite element operator for diffusion terms in avbp. Technical report, IFP, Janvier 2003.
- [19] O. Colin, F. Ducros, D. Veynante, and T. Poinso. A thickened flame model for large eddy simulations of turbulent premixed combustion. *Physics of Fluids*, 12(7) :1843–1863, 2000.
- [20] O. Colin and M. Rudgyard. Development of high-order taylor-galerkin schemes for unsteady calculations. *Journal of Computational Physics*, 162(2) :338–371, 2000.
- [21] G. Constantinescu, K. Mahesh, S. V. Apte, G. Iaccarino, F. Ham, and P. Moin. A new paradigm for simulation of turbulent combustion in realistic gas turbine combustors using les. In *ASME Turbo Expo 2003-Power for Land Sea and Air*, volume GT2003-38356, Atlanta, Georgia, USA, 2003. SP.
- [22] S.C. Crow and F.H. Champagne. Orderly structure in jet turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 48 :547–591, 1971.

- [23] A. Davis and A. Glezer. Mixing control of fuel jet using synthetic jet technology : velocity field measurements. In AIAA 99-0447, editor, *37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV*, 1999.
- [24] S. Denis, J. Delville, J.H. Garem, and J.P. Bonnet. Contrôle de l'expansion d'un jet rond par des jets impactants. In *14ème Congrès Français de Mécanique*, pages 1–6, Toulouse, 1999.
- [25] P.J. Disimile, E. Savory, and N. Toy. Mixing characteristics of twin impinging circular jets. *Journal of Propulsion and Power*, 11(6) :1118–1124, 1995.
- [26] H. Elbanna and S. Gahin. Investigation of two plane parallel jets. *AIAA Journal*, 21(7) :986–991, 1982.
- [27] V. Faivre. *Etude expérimentale et numérique du contrôle actif de jets dans des chambres de combustion - N°2053*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [28] V. Faivre and T. Poinso. Experimental and numerical investigations of jet active control for combustion applications. *Journal of Turbulence*, 5 :25, 2004.
- [29] B. Fiorina, R. Baron, O. Gicquel, D. Thevenin, S. Carpentier, and N. Darabiha. Modelling non-adiabatic partially premixed flames using flame-prolongation of ildm. *Combustion Theory and Modelling*, 7 :449–470, 2003.
- [30] G.E.F.G.N. Utilisation de l'oxygène dans les flammes de diffusion de gaz naturel. *Revue Générale de Thermique*, 214 :643–649, 1979.
- [31] M.R. Green and D.G. Crighton. Instability properties of interacting jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 350 :331–349, 1997.
- [32] D. Guo, A.W. Cary, and R.K. Agarwal. Numerical simulation of vectoring of a primary jet with a synthetic jet. *AIAA Journal*, 41(12) :2364–2370, December 2003.
- [33] M.I. Gurevich. *Theory of jets in an ideal fluid*. Pergamon Press, 1966.
- [34] D.A. Hammond and L.G. Redekopp. Global dynamics and aerodynamic flow vectoring of wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, 338 :231–248, 1997.
- [35] J.O. Hinze. *Turbulence*. McGraw-Hill, second edition, 1975.
- [36] C.M. Ho and E. Gutmark. Vortex induction and mass entrainment in a small-aspect-ratio elliptic jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 179 :383–405, 1987.
- [37] C.M. Ho and P. Huerre. Perturbed free shear layers. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 16 :365–424, 1984.

- 
- [38] C.A. Hunter and K.A. Deere. Computattional investigation of fluidic counterflow thrust vectoring. In AIAA 99-2669, editor, *35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Conference and Exhibit, Los Angeles, CA*, 1999.
- [39] J. Hureau and R. Weber. Impinging free jets of ideal fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 372 :357–374, 1998.
- [40] A.K.M.F. Hussain and K.B.M.Q. Zaman. Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. part 2. coherent structure dynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 101 :493–544, 1980.
- [41] L. Jonnson and M. Johansson. Ladle head. US4718646, January 1988.
- [42] J.C. Jouhaud. Calculs non-réactifs de la configuration 60608. communication privée, Décembre 2005.
- [43] Y. Joumani, C. Imbernon, R. Tsiava, and B. Leroux. Full oxy-conversion of a float furnace equipped with separated jets alglass fc burners : from 0d model to 3d characterization. *Ceramic Transactions*, 141 :53–62, 2004.
- [44] R.J. Kind and K. Suthanthiran. The interaction of two opposing plane turbulent wall jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 58(2) :389–402, 1973.
- [45] K.K. Kuo. *Principles of Combustion*. John Wiley & Sons, second edition, 2005.
- [46] B. Labégorre, N. Docquier, B. Zamuner, T. Lederlin, T. Poinso, and V. Faivre. Procédé et appareil d’injection d’un jet de fluide de direction et/ou d’ouverture variable. *Demande de brevet français*, 2006.
- [47] B. Labégorre, C. Lesieur, L. Salentey, P. Domingo, L. Vervisch, and J.C. Sautet. Turbulent combustion in a separated-jets burner. In AFRC-JFRC-IEA, editor, *Joint International Combustion Symposium*, Hawaii, USA, 2001.
- [48] S. Lardeau, E. Lamballais, and J.P. Bonnet. Direct numerical simulation of a jet controlled by fluid injection. *Journal of Turbulence*, 3, January 2002.
- [49] J.Ph. L  gier, T. Poinso, and D. Veynante. Dynamically thickened flame les model for premixed and non-premixed turbulent combustion. In *Proceedings of the Summer Program*, pages 157–168, Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford University, USA, 2000.
- [50] A.O.P. Leite, M.A. Ferreira, and J.A. Carvalho Jr. An investigation of multiple jet acetylene flames. *International Communications on Heat and Mass Transfer*, 23(7) :959–970, 1996.
- [51] B. Lenze, M.E. Milano, and R. Guenther. The mutual influence of jet diffusion flames. *Combustion Science and Technology*, 11 :1–8, 1975.

- [52] S. LePera and U. Vandsburger. A study of the coupling between parallel adjacent jets. In *37th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 99-0667, Reno, NV, January 11-14 1999.
- [53] B. Leroux, P. Duperray, P. Recourt, R. Tsiava, N. Perrin, and G. Todd. Alglass sun : A ultra-low-nox oxy-burner for glass furnaces with adjustable length and heat transfer profile. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 25(1) :117–127, 2004.
- [54] C. Lesieur. *Modélisation de la combustion turbulente non-prémélangée dans un brûleur à jets séparés, application à la stabilisation d'une oxy-flamme*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, 2003.
- [55] Y.F. Lin and M.J. Sheu. Investigation of two plane parallel unventilated jets. *Experiments in Fluids*, 10 :17–22, 1990.
- [56] U. Maas and S.B. Pope. Implementation of simplified chemical kinetics based on intrinsic low-dimensional manifolds. In The Combustion Institute, editor, *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*, pages 103–112, 1992. GB.
- [57] U. Maas and S.B. Pope. Simplifying chemical kinetics : intrinsic low-dimensional manifolds in composition space. *Combustion and Flame*, 88 :239–264, 1992.
- [58] G.F. Marsters. Interaction of two plane, parallel jets. *AIAA Journal*, 15(12) :1756–1762, January 1977.
- [59] C. Martin, L. Benoit, Y. Sommerer, F. Nicoud, and T. Poinso. Les and acoustic analysis of combustion instability in a staged turbulent swirled combustor. *AIAA Journal*, 44(4) :741–750, 2006.
- [60] M.S. Mason and W.J. Crowther. Fluidic thrust vectoring of low observable aircraft. In *CEAS Aerospace Aerodynamics Research Conference*, 13/39, Cambridge, UK, June 10-12 2002.
- [61] K. McManus, T. Poinso, and S. Candel. A review of active control methods for combustion instabilities. *Progress in Energy and Combustion Science*, 19 :1–29, 1992.
- [62] R. Menon and S.R. Gollahalli. Multiple jet gas flames in still air. *Heat Transfer in Fire and Combustion Systems*, 45 :127–132, 1985.
- [63] J. Mi, D.S. Nobes, and G.J. Nathan. Influence of jet exit conditions on the passive scalar field of an axisymmetric free jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 432 :91–125, 2001.
- [64] D.R. Miller and E.W. Comings. Force-momentum fields in a dual-jet flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 7 :237–256, 1960.

- [65] L.M. Milne-Thomson. *Theoretical hydrodynamics*. MacMillan, fifth edition, 1968.
- [66] V. Moureau, G. Lartigue, Y. Sommerer, C. Angelberger, O. Colin, and T. Poinso. Numerical methods for unsteady compressible multi-component reacting flows on fixed and moving grids. *Journal of Computational Physics*, 202(2) :710–736, 2004. NF.
- [67] G.H. Moustafa. Experimental investigation of high-speed twin jets. *AIAA Journal*, 32(11) :2320–2322, 1993.
- [68] G.J. Nathan, Z.T. Alwahabi, G.J.R. Newbold, and D.S. Nobes. Impact of a jet's exit flow pattern on mixing and combustion performance. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32 :496–538, 2006.
- [69] L.G. Pack and A. Seifert. Periodic excitation for jet vectoring and enhanced spreading. In *37th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 99-0672, Reno, NV, January 11-14 1999.
- [70] L. G. Pack-Melton and A. Seifert. Use of multiple actuators for jet vectoring. *Journal of Propulsion and Power*, 20 :572–575, 2004.
- [71] L. Pera and B. Gebahrt. Laminar plume interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, 68(2) :259–271, 1975.
- [72] N. Peters. *Turbulent Combustion*. Cambridge University Press, 2000.
- [73] N. Peters and F.A. Williams. Liftoff characteristics of turbulent jet diffusion flames. *AIAA Journal*, 21(3) :423–428, March 1983.
- [74] H. Pitsch. Large-eddy simulation of turbulent combustion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38 :453–482, 2006.
- [75] T. Poinso and S. Lele. Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows. *Journal of Computational Physics*, 101(1) :104–129, 1992.
- [76] T. Poinso and D. Veynante. *Theoretical and numerical combustion*. Edwards, first edition, 2001.
- [77] N. Rajaratnam. *Turbulent jets*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1976.
- [78] D. Rapoport, I. Fono, K. Cohen, and A. Seifert. Closed-loop vectoring control of a turbulent jet using periodic excitation. *Journal of Propulsion and Power*, 19(4) :646–654, 2003.
- [79] J. Ray, H.N. Najm, R.B. Milne, K.D. Devine, and S. Kempka. Triple flame structure and dynamics at the stabilization point of an unsteady lifted jet diffusion flame. In *28th Symp. (Int) on Combustion*, pages 219–226, Edinburgh, 2000. The Combustion Institute.

- [80] W.C. Reynolds, D.E. Parekh, P.J.D. Juvet, and M.J.D. Lee. Bifurcating and blooming jets. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35 :295–315, 2003.
- [81] B.J. Rho, J.K. Kim, and H.A. Dwyer. Experimental study of a turbulent cross jet. *AIAA Journal*, 28(5) :784–789, May 1990.
- [82] G.R. Ruetsch, L. Vervisch, and A. Linan. Effects of heat release on triple flames. *Physics of Fluids*, 7(6) :1447–1454, 1995.
- [83] P. Sagaut. *Introduction à la simulation des grandes échelles*. Springer, mathématiques & applications edition, 1998.
- [84] L. Salentey. *Etude expérimentale du comportement de brûleurs à jets séparés. Application à la combustion gaz naturel-oxygène pur*. PhD thesis, Faculté des Sciences et Techniques de l’Université de Rouen, 2002.
- [85] J.C. Sautet, T. Boushaki, L. Salentey, and B. Labegorre. Oxy-combustion properties of interacting separated jets. *Combustion Science and Technology*, 178 :2075–2096, 2006.
- [86] P. Schmitt, T.P. Poinsot, B. Schuermans, and K. Geigle. Large-eddy simulation and experimental study of heat transfer, nitric oxide emissions and combustion instability in a swirled turbulent high pressure burner. *Journal of Fluid Mechanics*, 570 :17–46, 2007.
- [87] L. Selle, G. Lartigue, T. Poinsot, R. Koch, K.-U. Schildmacher, W. Krebs, and D. Veynante. Compressible large-eddy simulation of turbulent combustion in complex geometry on unstructured meshes. *Combustion and Flame*, 137(4) :489–505, 2004.
- [88] L. Selle, F. Nicoud, and T. Poinsot. The actual impedance of non-reflecting boundary conditions : implications for the computation of resonators. *AIAA Journal*, 42(5) :958–964, 2004.
- [89] A. Sengissen, A. Giauque, G. Staffelbach, M. Porta, W. Krebs, P. Kaufmann, and T. Poinsot. Large eddy simulation of piloting effects on turbulent swirling flames. *In press in Proc. of the Combustion Institute*, 31, 2006. JX.
- [90] M.A. Singer and S.B. Pope. Exploiting isat to solve the equations of reacting flow. *Combustion Theory and Modelling*, 8 :361–383, 2004.
- [91] B.L. Smith and A. Glezer. Jet vectoring using synthetic jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 458 :1–34, 2002.
- [92] A. Sobiesiak, S. Rahbar, and H.A. Becker. Performance characteristics of the novel low-nox cgri burner for use with high air preheat. *Combustion and Flame*, 115 :93–125, 1998.

- 
- [93] D.B. Spalding. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. In *13th Symp. (Int) on Combustion*, pages 649–657, Pittsburgh, 1971. The Combustion Institute.
- [94] P.J.R. Strange and D.G. Crighton. Spinning modes on axisymmetric jets. part 1. *Journal of Fluid Mechanics*, 134 :231–245, 1983.
- [95] P.J. Strykowski, A. Krothapalli, and D.J. Forliti. Counterflow thrust vectoring of supersonic jets. *AIAA Journal*, 34(11) :2306–2314, November 1996.
- [96] L.K. Su, O.S. Sun, and M.G. Mungal. Experimental investigation of stabilization mechanisms in turbulent, lifted jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, 144 :494–512, 2006.
- [97] H. Suzuki, N. Kasagi, and Y. Suzuki. Active control of an axisymmetric jet with an intelligent nozzle. In *First International Symposium on Turbulent Shear Flow*, 1999.
- [98] K.W. Thompson. Time dependent boundary conditions for hyperbolic systems. *Journal of Computational Physics*, 68 :1–24, 1992.
- [99] J.M. Tournier. Turbulence et lois de paroi. Rapport de stage dea - institut national polytechnique de toulouse, CERFACS, 1983.
- [100] J.A. van Oijen, F.A. Lammers, and L.P.H. de Goeij. Modeling of complex premixed burner systems by using flamelet-generated manifolds. *Combustion and Flame*, 127(3) :2124–2134, 2001.
- [101] L. Vanquickenborne and A. Van Tiggelen. The stabilization mechanism of lifted diffusion flames. *Combustion and Flame*, 10 :59–69, 1966.
- [102] L. Vervisch. Calculs 1D de flamme méthane-oxygène. communication privée, Janvier 2006.
- [103] L. Vervisch and T. Poinso. Direct numerical simulation of non-premixed turbulent flames. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30 :655–691, 1998.
- [104] D. Veynante, L. Vervisch, T. Poinso, G.R. Ruestch, and A. Linan. Triple flame structure and diffusion flame stabilization. In *Proceedings of the Summer Program*, Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford University, USA, 1994.
- [105] H. Viets. Flip-flop jet nozzle. *AIAA Journal*, 13(10) :1375–1379, October 1975.
- [106] C.S. Wang, Y.F. Lin, and M.J. Sheu. Measurements of turbulent inclined plane dual jets. *Experiments in Fluids*, 16 :27–35, 1993.
- [107] J. Wang, G.H. Priestman, and D. Wu. An analytical solution for incompressible flow through parallel multiple jets. *Journal of Fluids Engineering*, 123 :407–410, 2001.
- [108] F.A. Williams. *Combustion theory*. Benjamin Cummings, second edition, 1985.

- [109] H. Yamashita, M. Shimada, and T. Takeno. A numerical study on flame stability at the transition point of jet diffusion flames. In The Combustion Institute, editor, *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, pages 27–34, 1996. GB.
- [110] I. Yimer, H.A. Becker, and E.W. Grandmaison. The strong jet/weak jet problem : new experiments and cfd. *Combustion and Flame*, 124 :481–502, 2001.
- [111] B. Yip, A. Lozano, and R.K. Hanson. Sensitized phosphorescence : a gas phase molecular mixing diagnostic. *Experiments in Fluids*, 17 :16–23, 1994.
- [112] K.B.M.Q. Zaman, M.F. Reeder, and M. Saminy. Control of an axisymmetric jet using vortex generators. *Physics of Fluids*, 6(2) :778–793, 1994.





## Annexe A

# Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de mélange dans un écoulement à deux jets

Dans un écoulement non réactif, la température est un scalaire passif et sa mesure permet d'analyser le mélange, comme le feraient des mesures de concentration d'espèces. Dans le cas du bi-jet, l'indice de mélange  $Z$  présenté au chapitre 4 s'écrit :

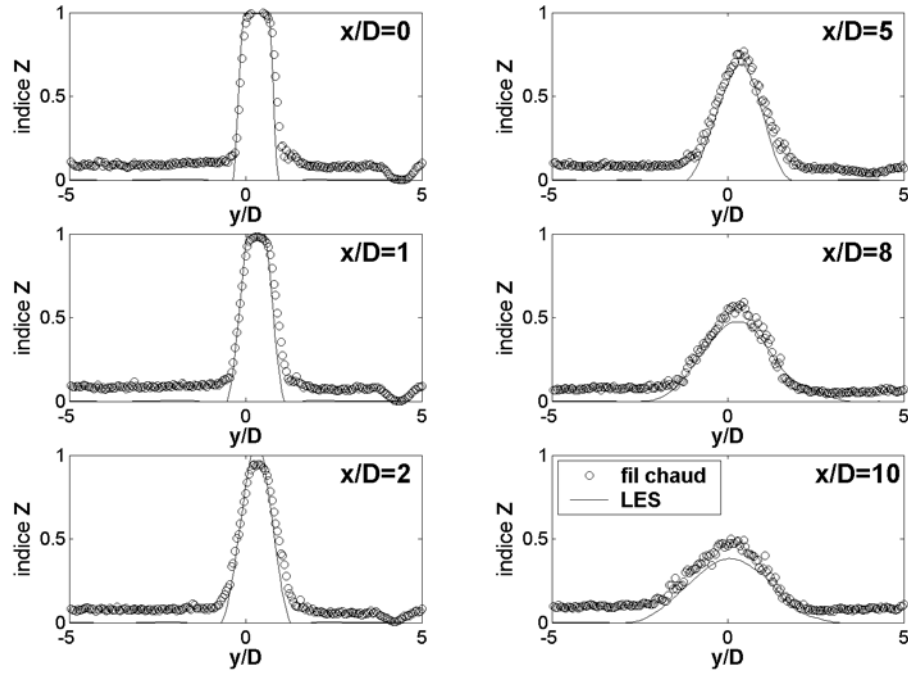
$$Z = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{A.1})$$

où  $T_1$  est la température initiale du jet froid et  $T_2$  celle du jet chaud.  $Z$  traduit le mélange entre trois sources : le jet chaud, le jet froid et l'air ambiant (si les parois de la boîte de confinement sont rendues adiabatiques par isolation thermique, la température de l'air ambiant résulte uniquement du mélange entre les jets et  $Z$  est la fraction de mélange de l'écoulement, sinon  $Z$  est un indicateur qualitatif de mélange). Les mêmes remarques s'appliquent à des mesures concentration (par exemple, en utilisant la fluorescence induite par laser) desquelles on peut aussi extraire  $Z$ . Par ailleurs, certains auteurs mesurent uniquement le mélange entre deux jets, en utilisant des techniques expérimentales de fluorescence et phosphorescence qui nécessitent l'emploi de deux dopants, deux lasers et/ou deux caméras [111].

A partir d'une solution numérique, on peut obtenir la valeur de  $Z$  en utilisant exactement la même technique qu'expérimentalement : soit par le champ de température, soit par la concentration d'un traceur fictif. Ainsi il est théoriquement possible de comparer précisément les valeurs expérimentales et numériques du mélange d'un écoulement à deux jets. Dans notre cas, cela suppose que dans tout le domaine de

calcul (boîte de confinement), le mélange soit parfaitement établi. Cependant les faibles vitesses loin des jets et les grandes dimensions de la boîte nécessiteraient des temps de calcul considérables pour atteindre un tel équilibre. De plus, des entrées d'air se produisent dans la réalité en sortie de la boîte, créées par les recirculations internes, aussi une condition limite précise d'entrée/sortie serait nécessaire pour le calcul.

Nos simulations ne remplissent pas ces conditions, la comparaison des champs moyens de  $Z$  entre nos mesures et le calculs LES sont présentés sur la figure A.1 dans le cas non-actionné. On note sur



**FIG. A.1:** Comparaison LES/fil froid des profils moyens de  $Z$  pour le bi-jet non-actionné

les profils expérimentaux que  $Z$  est supérieur à zéro en dehors des zones de jet et ne tombe à zéro que dans le jet froid. Ceci n'est pas visible sur les profils de LES qui tombent à zéro dans le jet froid et dans les zones extérieures, où la température est encore à sa valeur initiale. Même si les pics de  $Z$ , en particulier leur pente, sont correctement rendus par la LES, les transferts thermiques dans l'écoulement réel et l'écoulement numérique ne sont pas les mêmes et le mélange ne peut pas être raisonnablement comparé.

## **Annexe B**

### **Brevet du système d'injection**

Demande de brevet français pour :

5 Procédé et appareil d'injection d'un jet de fluide de direction et/ou d'ouverture  
variable

Au nom de :

L'AIR LIQUIDE, Société Anonyme pour l'Etude et l'Exploitation des Procédés  
Georges Claude

10

Inventeurs :

Bernard LABEGORRE, Nicolas DOCQUIER, Bernard ZAMUNER,  
Thomas LEDERLIN, Thierry POINSOT, Vincent FAIVRE

15

**Abrégé**

L'invention concerne un appareil d'injection d'au moins un jet de fluide dont la  
direction et/ou l'ouverture de l'un des jets au moins peut être variable,  
20 comportant des moyens d'injection d'au moins un jet de fluide principal, des  
moyens d'injection d'au moins un jet de fluide secondaire, et des moyens pour  
contrôler la quantité de mouvement d'au moins un jet de fluide principal et/ou  
d'au moins un jet de fluide secondaire et des moyens pour faire interagir au  
moins un jet de fluide principal et au moins un jet de fluide secondaire et  
25 engendrer un jet de fluide résultant de cette interaction dont la direction et/ou  
l'ouverture sont variables, ainsi que le procédé associé et leurs utilisations.  
Application aux brûleurs



**Service Reprographie**

M.Sabater

IMFT-Allée du Pr.Camille Soula  
31400 Toulouse

☎ 05 61 28 58 27

